LIVRO DE ATAS

XIII CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

21-23 JUL 2025

XIII Congreso Ibérico de Agroingeniería

AGRO Ingeniería

SCAP

Livro de atas

XIII Congresso Ibérico de Agroengenharia

Libro de actas del XIII Congreso Ibérico de Agroingeniería

Book of proceedings of the 13th Iberian Agroengineering Congress

Título:

Livro de atas do XIII Congreso Ibérico de Agroengenharia.

(Libro de actas del XIII Congreso Ibérico de Agroingeniria)

(Proceedings of the 13 th Iberian Agroengineering Congress)

Editores:

José Manuel Gonçalves

Antonio Ruiz Canales

Rosa Guilherme

Luis Alcino Conceição

Carmen Jarén Ceballos

Edição / Publicado:

Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro

1ª Edición. Coimbra, 2025

ISBN: 978-972-569-171-7

URL:

Formato for citation:

Gonçalves, J. M., Ruiz Canales, A., Guilherme, R., Conceição, L. A., & Jarén Ceballos, C. (Eds.). (2025). Livro de Atas do XIII Congresso Ibérico de Agroengenharia (1ª ed.). Coimbra, Portugal. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. ISBN 978-972-569-171-7. pp.1483

ORGANIZAÇÃO

AGRO Ingeniería

SCAP
SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL
SEER - Secção Especializada de Engenharia Rural

ENTIDADES PATROCINADORAS

BKT
GROWING TOGETHER

ENTIDADES COLABORADORAS

CCDR CENTRO
COMISSÃO DE COORDENAÇÃO E DESENVOLVIMENTO REGIONAL DO CENTRO, I.P.

APRH
ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS

INIA
URUGUAY

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

AJAVM
ASSOCIAÇÃO DE JOVENS AGRICULTORES DO VALE DO MONDEGO

INOVTECHAGRO
CENTRO NACIONAL DE COMPETÊNCIAS PARA A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DO SECTOR AGROFLORESTAL

CIGR

Mensagem da Presidente da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, I. P.

XIII Congresso Ibérico de Agroengenharia

Coimbra, 2025

A região Centro de Portugal orgulha-se de acolher, em 2025, o XIII Congresso Ibérico de Agroengenharia, que terá lugar na cidade de Coimbra — uma referência nacional e internacional no ensino, na ciência e na cultura, numa região que se distingue pela sua diversidade paisagística, riqueza ambiental, forte tradição agrícola e dinâmica de inovação.

Em nome da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDR Centro), deixo uma palavra de agradecimento a todos os que tornaram possível a realização deste evento e, em particular, às entidades organizadoras pela escolha de um território que tanto tem para oferecer no plano científico, técnico, institucional e humano.

Coimbra é, desde há séculos, um espaço de saber e encontro. A sua identidade académica, cultural e patrimonial torna-a o palco ideal para acolher um congresso que é, por natureza, um espaço de partilha, de construção de redes e de aprofundamento do conhecimento. Este encontro representa muito mais do que um programa técnico-científico — é um testemunho vivo da cooperação ibérica, da vontade de trabalhar em conjunto por um futuro rural mais resiliente, produtivo e sustentável.

Portugal e Espanha partilham mais do que uma geografia comum. Partilham desafios, histórias, culturas agrárias complementares, e uma forte vocação para a inovação no setor agroalimentar. A cooperação entre os dois países — e entre as suas regiões, como o Centro, o Alentejo, o Algarve e a Andaluzia — é não só desejável como necessária. Os territórios de fronteira e as comunidades rurais sabem, há muito, que o desenvolvimento passa pela colaboração, pela criação de pontes e pela partilha de soluções.

É com especial satisfação que saudamos, também, a participação de representantes de países da América Latina, cuja presença reforça a dimensão internacional deste Congresso e enriquece o debate com perspetivas diversas e experiências complementares. A cooperação entre a Península Ibérica e a América Latina, alicerçada por laços históricos e linguísticos, é um importante vetor de desenvolvimento do conhecimento da engenharia e da inovação rural.

O presente impõe-nos novos ritmos e prioridades. Fenómenos como as alterações climáticas, a crescente escassez de recursos, a instabilidade global e as transformações estruturais nas áreas da tecnologia e da energia exigem uma resposta articulada e sustentada. É precisamente neste contexto que a Agroengenharia se afirma como disciplina estratégica: desde a gestão eficiente da água e do solo, à agricultura de precisão, à mecanização sustentável, à regeneração dos ecossistemas agrícolas e florestais, até à digitalização e valorização dos recursos endógenos. O conhecimento e a técnica são, mais do que nunca, alicerces de um novo modelo de desenvolvimento para os territórios rurais.

A CCDR Centro tem vindo a afirmar esta visão através do Programa Regional do Centro – Centro 2030, promovendo o investimento, a inovação, a transição verde e a coesão territorial. Encontros como este Congresso são fundamentais para aproximar a ciência e a ação, a academia e os territórios, o conhecimento e a governação. É na convergência entre pessoas, instituições e ideias que se constrói o futuro.

Acreditamos que este Congresso será mais um marco no reforço da cooperação ibérica e no reconhecimento do valor da agroengenharia para o desenvolvimento sustentável da nossa região e da Península. Desejamos a todos os participantes jornadas inspiradoras, produtivas e enriquecedoras, com Coimbra como cenário de excelência para esse caminho comum.

Apresentação /Presentación

A Engenharia Rural assume, hoje mais do que nunca, um papel determinante no desenvolvimento de soluções inovadoras para os desafios que a agricultura enfrenta num mundo em rápida transformação. As alterações climáticas, a pressão sobre os recursos naturais, a necessidade de garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade dos sistemas agroflorestais exigem uma abordagem multidisciplinar, tecnológica e profundamente enraizada no conhecimento do território.

Neste contexto, o XIII Congresso de Engenharia Rural reafirma-se como um espaço de excelência para a partilha de conhecimento, onde investigadores, profissionais e estudantes de países de língua portuguesa e espanhola podem unir esforços, trocar experiências e construir pontes para a inovação. A cooperação ibérica e lusófona e latino-americana é essencial para promover investigação aplicada que responda aos desafios locais com impacto global, fortalecendo a capacidade de adaptação e resiliência das comunidades rurais.

Os editores deste livro de atas veem grande satisfação reunidos neste documento os contributos científicos que refletem a vitalidade e a diversidade das áreas que compõem a Engenharia Rural. Estes trabalhos não só evidenciam a importância de integrar ciência, tecnologia e prática, como também reforçam a necessidade de uma colaboração contínua entre países e instituições para que a agricultura do futuro seja mais inteligente, sustentável e inclusiva.

Os editores, em nome da organização, querem expressar o agradecimento à Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, I.P., a publicação deste livro de Atas.

Editores

José Manuel Monteiro Gonçalves
Antonio Ruiz Canales
Rosa Guilherme
Luis Alcino da Conceição
Carmen Jarén Ceballos

COMISSÃO ORGANIZADORA / COMITE ORGANIZADOR

José Manuel Gonçalves | Presidente
Antonio Ruiz Canales
Carmen Jarén
Manuel Pérez Ruiz
Ortiz Sánchez Coral
Luís Alcino Conceição
Adélia Maria Oliveira de Sousa
José Carlos Barbosa
Fátima Baptista
Justina Franco
Kiril Bahcevandziev
Teresa Vasconcelos
José Manuel Torres Farinha
Rosa Guilherme
Goreti Botelho
Diana Valente
Susana Ferreira
Luis Miguel Roque da Silva
José Carlos Silva Rico
Diogo José de Resende Coelho

COMISSAO CIENTIFICA / COMITÉ CIENTIFICO

Secção Especializada de Engenharia Rural da Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal

Adélia Sousa | Universidade de Évora - MED
António Bento Dias | Universidade de Évora - MED
António Canatário Duarte | Instituto Politécnico de Castelo Branco
António Castro Ribeiro | Instituto Politécnico de Bragança
Arlindo Almeida | Instituto Politécnico de Bragança
Fátima Baptista | Universidade de Évora
João Lopes Rolim | Universidade de Lisboa
João Manuel Serrano | Universidade de Évora - MED
João Paulo Baptista Carneiro | Instituto Politécnico de Castelo Branco
José Carlos Barbosa | Instituto Politécnico de Bragança
José Manuel Gonçalves | Instituto Politécnico de Coimbra
José Rafael Marques da Silva | Universidade de Évora - MED
José Silvestre | Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária
Luís Alcino da Conceição | Instituto Politécnico de Portalegre
Luís Leopoldo Silva | Universidade de Évora - MED
Manuela Simões | Universidade Nova de Lisboa
Maria do Rosário Cameira | Universidade de Lisboa
Miguel Leão | Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária
Teresa Paço | Universidade de Lisboa
Vasco Fitas da Cruz | Universidade de Évora - MED

Sociedad Española de Agroingeniería

Adriana Correa Guimaraes | Universidad de Valladolid
Ana Isabel García García | Universidad Politécnica de Madrid
Ana Martí de Olives | Universidad Miguel Hernández
Andrés Martínez Rodríguez | Universidad de Valladolid
Antonio Brasa Ramos | Universidad de Castilla - La Mancha
Antonio Delgado García | Universidad de Sevilla
Carmen Jarén | Universidad Pública de Navarra
Carmen Rocamora Osorio | Universidad Miguel Hernández de Elche
Coral Ortíz Sánchez | Universidad Politécnica de Valencia
Diego Valera Martínez | Universidad de Almería
Emilio Camacho Poyato | Universidad de Córdoba

Emilio Gil | Universidad Politécnica de Cataluña
Esperanza Ayuga Téllez | Universidad Politécnica de Madrid
Eva Sánchez-Hernández | Universidad de Valladolid
Francisco Ayuga Téllez | Universidad Politécnica de Madrid
Francisco Javier García Ramos | Universidad de Zaragoza
Herminia Puerto Molina | Universidad Miguel Hernández de Elche
Hugo Malón Litago - Universidad de Zaragoza
Javier Bueno Lema | Universidad de Santiago de Compostela
José Antonio Flores Yepes | Universidad Miguel Hernández de Elche
José Blasco Ivars | Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
José Casanova Gascón | Universidad de Zaragoza
José Luis García Fernández | Universidad Politécnica de Madrid
José Miguel Molina Martínez | Universidad Politécnica de Cartagena
Juan Agüera Vega | Universidad de Córdoba
Juan Manuel Antolín Rodríguez | Universidad de Valladolid
Luis Manuel Navas Gracia | Universidad de Valladolid
Manuel Avilés Guerrero | Universidad de Sevilla
Manuel Moya Ignacio | Universidad de Extremadura
Manuela Simões | Universidade Nova de Lisboa
María Ángeles Grande Ortíz | Universidad Politécnica de Madrid
María Dolores Pérez Marín | Universidad de Córdoba
Martín Barrasa Rioja | Universidad de Santiago de Compostela
Miguel Ángel Moreno Hidalgo | Universidad de Castilla-La Mancha
Pablo Martín-Ramos | Universidad de Valladolid
Pablo Melgarejo Moreno | Universidad Miguel Hernández
Pedro Aguado Rodríguez | Universidad de León
Pilar Barreiro Elorza | Universidad Politécnica de Madrid
Rosario Castro Abengoza | Universidad de León
Salvador Calvet Sanz | Universidad Politécnica de Valencia
Silvia Arazuri Garín | Universidad Pública de Navarra
Victoriano Martínez Álvarez | Universidad Politécnica de Cartagena

Índice

13
Agricultura de Precisão
Agricultura de Precisión

183
Automação e Digitalização
Automatización y Digitalización

221
Digitalização
Digitalización

275
Inteligência Artificial
Inteligencia Artificial

311
Mecanização e Telemetria
Mecanización y Telemetría

527
Rega e Drenagem
Riego y Drenaje

873
Tecnologia das Estufas
Tecnología de Invernaderos

905
Tecnologia de Pós-Colheita
Tecnología Postcosecha

963
Construções Rurais
Construcción Rural

1065
Produção Animal/ Aquacultura
Producción Animal/ Acuicultura

1135
Projetos, Meio ambiente e Território
Proyectos, Medio Ambiente y Territorio

1321
Energia
Energía

1393
Inovação Educacional
Innovación Educativa

PARTE 1

AGRICULTURA DE PRECISÃO

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Índice

Otimização do espaçamento e densidade de sementeira em milho-grão....15

Uso de Sensores para Avaliação da Refletância Foliar na Fertilização Sustentável em Olival 28

Combinação de sensores próximos para avaliação da produtividade e da qualidade da pastagem: Altura comprimida × NDVI 36

Spatio-temporal analysis of the population dynamics of the codling moth in a large fruit-growing area to obtain improved spatial-wide-scale warning maps 51

Pest Patterns Uncovered: Dynamic Spatiotemporal Modeling of BMSB in Emilia-Romagna....59

Estimación del Rendimiento del Trigo a partir de Índices de Vegetación y Análisis Multivariado en Sistemas de Siembra Directa y Convencional 70

Diseño, análisis, diseño y cálculo de la instalación de un alumbrado inteligente en sistemas agrovoltaicos en un cultivo de patata.....83

Estimación del contenido de Nitrógeno y Clorofila en el Cultivo de Alfalfa mediante Imágenes Multiespectrales de Drones....92

Conteo y detección de agave utilizando visión e inteligencia artificial en imágenes RGB de RPAS.... 104

Sensoriamento hiperespectral para avaliação de genótipos de batata-doce (Ipomoea batatas (L.)) 113

Development of low-cost sensors, machine learning and collaborative IoT ecosystems for the precise irrigation of orchards and vineyards.... 121

A espectroscopia de campo, uma ferramenta de base para a sanidade vegetal. O caso do míldio em Vitis vinifera Loureiro 131

Nuevo dispositivo mediante sensores infrarrojos térmicos para RPAS utilizado en el monitoreo del estado hídrico de cultivos agrícolas 143

Desarrollo de modelos de crecimiento en cultivo de lechuga para un riego de precisión.... 153

The role of Smartvitinet's Competence Centre in the development of the wine sector. 164

Comparativa de la entrada en producción de 4 variedades de manzanos en Valladolid 173

Otimização do espaçamento e densidade de sementeira em milho-grão

Luís Silva [1,2,*], Luís Alcino Conceição [2,3] e Tiago Silva Pinto [4]

1 Departamento Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Campus da Caparica, Universidade NOVA de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal; lmr.silva@campus.fct.unl.pt

2 VALORIZA—Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos, Universidade Politécnica de Portalegre, 7300-110 Portalegre; luis_conceicao@ipportalegre.pt

3 InovTechAgro—National Skills Center for Technological Innovation in the Agroforestry Sector, 7300-110 Portalegre, Portugal; luis_conceicao@ipportalegre.pt

4 InovMilho—Centro Nacional de Competências das Culturas do Milho e Sorgo; anpromis@anpromis.pt

* Correspondence: lsilva@ipportalegre.pt

Resumo: A otimização da produtividade do milho-grão é crucial para a sustentabilidade agrícola, especialmente sob rega localizada. Este estudo avaliou o impacto de espaçamentos de entrelinhas e densidades de sementeira na produtividade. Os ensaios ocorreram na Estação Experimental António Teixeira (Coruche) entre 2023 e 2024, comparando espaçamentos de 0,75 m (convencional) e 1,5 m (alargado), com densidades de 80 000 e 160 000 plantas/ha, em duas variedades de milho (A e B). A monitorização por VANT's forneceu dados multiespectrais para análise. Os resultados mostraram que espaçamentos alargados mantiveram produtividades próximas à testemunha (80 000 plantas/ha a 0,75 m). O espaçamento de 1,5 m com 80 000 plantas/ha resultou em 14,7 t/ha, enquanto a densidade maior (160 000 plantas/ha) atingiu 15,3 t/ha. A variedade A manteve produtividades estáveis, enquanto a B teve uma leve redução. Os dados do segundo ano indicam tendência semelhante. Conclui-se que aumentar a densidade pode melhorar a produtividade sem perdas significativas, permitindo ajustes nas práticas de sementeira e rega. Estudos futuros devem avaliar impactos sobre infestantes, pragas, doenças e captação de luz, garantindo um maneio ainda mais eficiente da cultura.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Gestão; Itinerário cultural; Rega; Infestantes; Eficiência; Deteção remota.

1. Introdução

A otimização do espaçamento e da densidade de sementeira no milho (Zea mays L.) é crucial para maximizar o rendimento da sua cultura para colheita de grãos [1]. Vários estudos investigaram os efeitos de diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de sementeira no rendimento da cultura de milho-grão, fornecendo informações valiosas para práticas agrícolas eficazes.

Enquanto alguns autores demonstraram que densidades de plantas mais elevadas, seguindo um espaçamento entre linhas mais estreito, podem conduzir a um aumento do rendimento de toda a planta de milho, sendo o impacto da densidade populacional mais significativo do que o espaçamento entre linhas e a escolha do híbrido [2], outros autores indicam que o aumento da densidade de plantas e a redução do espaçamento entre linhas podem levar a níveis mais baixos de água no solo devido a uma maior extração de água, afetando a disponibilidade de água no solo [3]. No entanto a questão do espaçamento de entrelinha e densidade de sementeira, tem influência noutros aspetos da cultura. Foi demonstrado que o espaçamento entre linhas estreito diminui a densidade e a biomassa das infestantes, conduzindo a um aumento do rendimento da cultura milho-grão [4].

Muitas espécies vegetais infestantes das culturas agrícolas possuem características tóxicas, representando um risco para humanos e animais ao contaminarem produtos agrícolas. A figueira-do-inferno (*Datura stramonium*), da família *Solanaceae*, é uma planta tóxica comum em campos irrigados, especialmente de milho e hortícolas, com sementes altamente viáveis por mais de 40 anos. Devido à acumulação de alcaloides do tropano, todas as partes da figueira-do-inferno são tóxicas, com destaque para as sementes, podendo causar efeitos graves no sistema nervoso, cardiovascular e respiratório de humanos e animais [5].

Outros autores demonstraram ainda que os resultados podem estar relacionados com outras técnicas do itinerário cultural para além do espaçamento da entrelinha e da densidade de sementeira, como o caso da preparação das sementes. A preparação das sementes pode reduzir significativamente o tempo até à emergência das plântulas, do fecho da canópia, do atingimento da maturidade do milho, conduzindo, em última análise, a um melhor rendimento da cultura [6].

Para determinar o espaçamento e a densidade de sementes ideais para a cultura do milho, é necessário ter em conta vários fatores. Estes fatores estão resumidos no Quadro 1.

Quadro 1. Principais fatores com impacto no rendimento da cultura milho-grão, e influência no espaçamento de entrelinhas e densidade de sementeira.

Fator	Impacto	Condições ótimas	Referências
Densidade de sementeira	Afeta a produtividade, a humidade do solo e a competição pelos nutrientes	~82 000 plantas/ha sob condições ótimas	[3,7]
Espaçamento de entrelinhas	Influencia a interceção da luz, supressão das infestantes e produtividade	Entrelinhas estreitas (0,45 m) ou entrelinhas alargadas (0,80+0,40 m)	[1,7,8]

Solo e ambiente	Afeta a germinação, o crescimento inicial e a disponibilidade dos inputs	Considerar as condições de humidade e temperatura de solo locais	[3,9]
Fertilização	Favorece a disponibilidade dos nutrientes e a estrutura da canópia	Integrar as práticas de fertilização	[10,11]
Utilização da luz	Maximiza a fotossíntese e a produtividade	Otimizar a interceção da luz pela canópia e usar mulching refletivo	[1,7,10]
Gestão de infestantes	Reduz a competição e a perda de produtividade	Entrelinhas estreitas e controlo de infestantes efetivo	[6,12,13]
Preparação das sementes	Melhora a emergência e o desenvolvimento inicial das plantas	Utilizar hidroescorvamento ou extratos de plantas naturais	[6]

Têm vindo a ser desenvolvidos e testados sistemas de deteção e medição de prova de conceito para medir o espaçamento entre sementes, a profundidade de sementeira e a geolocalização de sementes de milho, demonstrando o potencial de medição exata do espaçamento entre sementes e da profundidade de sementeira [9]. A técnica de imagem hiperespectral foi investigada quanto à sua exatidão na classificação de sementes de milho viáveis e não viáveis, proporcionando um método não destrutivo e exato para o teste de viabilidade de sementes [14].

Este trabalho foca-se assim na otimização do espaçamento e da densidade das sementes na cultura do milho focando-se numa combinação de fatores como o espaçamento entre linhas, a densidade de plantação e a rega por um sistema de rega localizada, que podem ter um impacto significativo no rendimento das culturas e na sustentabilidade ambiental. Através do uso de ferramentas tecnológicas para medir com precisão o espaçamento, a viabilidade das sementes, e o rendimento das culturas, este trabalho pretende contribuir para melhorar as práticas de cultivo.

2. Materiais e Métodos

2.1. Enquadramento e design de instalação dos ensaios

O ensaio decorreu na Estação Experimental António Teixeira, em Coruche (38.941844, -8.512472), entre maio e setembro das campanhas agrícolas de 2023 e 2024. As parcelas localizam-se numa região de clima CSa de acordo com Koppen [15], onde os solos predominantes são do tipo Vt (solos normais litólicos, não húmicos, ligeiramente insaturados, com arenitos grosseiros) e Ppt (solos podzolizados - podzóis não hidromórficos, com surraipa, com horizonte A2 incipiente, em ou sobre arenitos) [16].

Seguiu-se um itinerário técnico convencional de mobilização de solo e sementeira em linhas de milho-grão. Instalaram-se cinco parcelas em cada campanha agrícola, distintas apenas no espaçamento da entrelinha. Todas as práticas de fertilização, tratamentos fitossanitários e dotações de rega seguiram as práticas realizadas na região. Em cada campanha agrícola, uma das parcelas instaladas foi considerada testemunha, por seguir o espaçamento de entrelinha tradicional – 0,75 metros – e as outras quatro seguiram um espaçamento alargado –1,50 metros. Foram testadas densidades de 80 000 e 160 000 plantas por ha, com duas variedades de milho. As variáveis testadas foram a variedade semeada, o espaçamento da entrelinha e a densidade de sementeira (Quadro 2).

Quadro 2. Variáveis estudadas no ensaio e respetivas variações.

Ensaio	**Variedade**	**Entrelinha (m)**	**Densidade de sementeira (nº de sementes/ha)**
Testemunha	A	0,75	75 000
I	A	1,50	80 000
II	A	1,50	160 000
III	B	1,50	80 000
IV	B	1,50	160 000

2.2. Monitorização e avaliação dos ensaios

Em cada talhão foram traçados pontos de amostragem que consistiram em cinco metros lineares traçados aleatoriamente na parcela onde se recolheram as amostras de performance, produtividade e vigor vegetativo. Nestes locais de amostragem, mediram-se o número de plantas, o número de maçarocas, quantidade de grãos de milho produzidos em peso húmido, teor de humidade do grão, NDMI e NDVI.

O cálculo da produtividade (kg ha^{-1}) seguiu as Equações 1 e 2:

$$\text{Produtividade húmida (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Número de espigas por ha} \times \text{Peso médio do grão por espiga} \times 100 \quad (1)$$

e a Equação 2 onde a produtividade é ajustada ao teor de humidade do grão.

$$\text{Produtividade (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Produtividade húmida (kg ha}^{-1}\text{)} \times \frac{Teor\ de\ humidade\ no\ grão\ (\%)}{Teor\ de\ humidade\ no\ grão\ standard\ (\%)} \quad (2)$$

onde a Produtividade Húmida (kg ha–1) foi calculada na Equação 1, o teor de humidade no grão foi analisado em cada ponto de amostragem, e o teor de humidade no grão standard assumido foi de 14 % no peso do grão.

2.2.1. Marcação dos locais de amostragem

Para marcar os locais de amostragem utilizou-se um dispositivo de geolocalização Spectra Geospatial MobileMapper 60 (Trimble Inc., Westminster, USA), equipado com Android™ 10 e um processador de 2,2 GHz, 4 GB de memória, 64 GB de armazenamento (Figura 1).

Figura 1. Dispositivo de geolocalização Spectra Geospatial MobileMapper 60 utilizado.

2.2.2. Deteção remota dos índices vegetativos

Para recolher os dados de vigor vegetativo e saúde das plantas utilizou-se uma câmara multiespectral DJI, acoplada a um VANT DJI Phantom4 RTK (DJI, Shenzhen, China), e os pontos de controlo de posicionamento; Para o processamento das imagens recolhidas e criação dos ortofotomapas utilizou-se o software Pix4D Fields (Pix4D, Prilly, Switzerland).

2.2.3. Medição de performance e produtividade

Foram utilizados sacos devidamente etiquetados para recolha das maçarocas no campo (Figura 2 (a)), e depois utilizou-se uma balança e um higrómetro para medir a produção e o teor de humidade no grão (Figura 2 (b)).

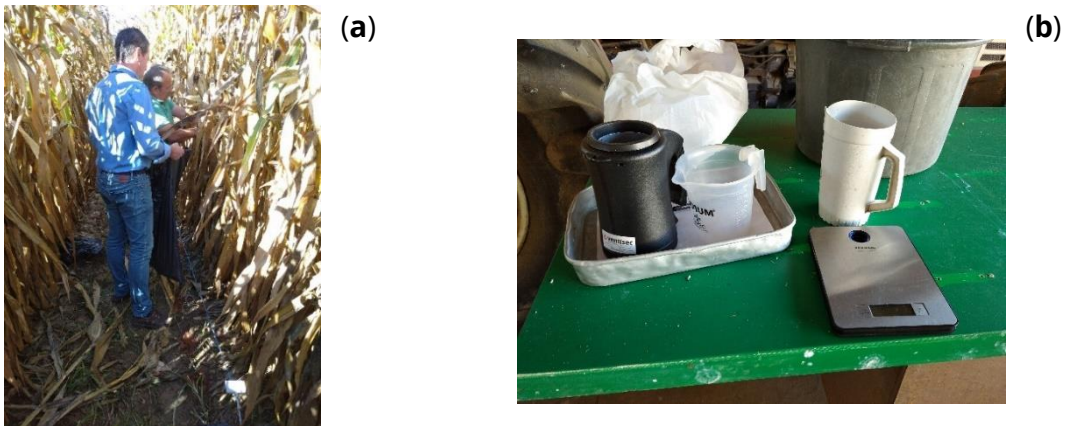


Figura 2. (**a**) Recolha das amostras em campo para análise da produtividade; (**b**) Materiais utilizados para análise do teor de humidade do grão e peso do grão.

2.3. Análise estatística

Foi realizada uma análise estatística e inferencial para iniciar a análise dos dados gerais, incluindo o coeficiente de variação, desvio padrão e análise interquartil, no RStudio©v.2023.4.3.2 com o pacote R©psych Package v. 2.4.3 CRAN Repository [17,18]. Os dados foram então agrupados por variedade, espaçamento de entrelinha, densidade de sementeira e as variáveis dependentes (os parâmetros número de plantas, número de maçarocas, Produtividade ajustada, Indice "Água" e NDVI).

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado a cada variável dependente como teste de normalidade. As variáveis com distribuição não normal foram analisadas pelo teste de Kruskal-Wallis e as com distribuição normal foram analisadas pela ANOVA.

As análises post hoc que se seguiram ao teste de Kruskal-Wallis utilizaram o teste de Dunn no RStudio©v.2023.4.3.2 com o pacote R©dunn.test Package v. 1.3.6 CRAN Repository [17,19]. No caso de análises post hoc após a ANOVA, foi utilizado o teste HSD de Tukey.

Por último, foi utilizada uma matriz de correlação para encontrar relações fortes entre as variáveis dependentes.

3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos mostram diferenças claras no número de plantas, número de maçarocas e produtividade ajustada (Pa) entre os diferentes ensaios (Quadro 3). A variedade A, na densidade de 160 000 sementes/ha (ensaio II), apresentou o maior valor de produtividade (15 294,1 kg/ha), acompanhada por um número elevado de maçarocas (42), ainda que com menos plantas do que o ensaio I. A variedade B, por

outro lado, registou produtividades mais baixas em ambas as densidades testadas, com o valor mínimo observado no ensaio III (12 067,0 kg/ha). A parcela testemunha, com a densidade tradicional de 75 000 sementes/ha e espaçamento de 0,75 m, obteve um rendimento intermédio (14 163,0 kg/ha), servindo de referência para os restantes tratamentos. Os índices vegetativos esperados (NDMI e NDVI) acompanham a tendência dos dados de produtividade, sugerindo maior vigor e cobertura nas parcelas com densidade e rendimento superiores.

Quadro 3. Resultados das variáveis estudadas no ensaio e respetivas variações.

Ensaio	Variedade	Entrelinha (m)	Densidade de sementeira (nº de sementes/ha)	Nº de plantas	Nº de maçarocas	Pa (kg ha^{-1})	NDMI	NDVI
Testemunha	A	0,75	75 000	26	13	14 163,0	0,30	0,68
I	A	1,50	80 000	87	26	14 746,1	0,35	0,70
II	A	1,50	160 000	49	42	15 294,1	0,42	0,74
III	B	1,50	80 000	79	25	12 067,0	0,32	0,66
IV	B	1,50	160 000	55	33	12 209,7	0,36	0,69

Pa (kg ha^{-1}).

A análise dos dados sugere que o aumento da densidade de sementeira, especialmente na variedade A, contribuiu para uma maior produtividade, confirmando a tendência identificada na literatura de que o aumento da densidade até certo limite promove maior aproveitamento dos recursos disponíveis, como a luz e a água. No entanto, a variedade B mostrou uma resposta menos eficiente ao aumento da densidade, o que pode estar relacionado com características genéticas e adaptabilidade ao espaçamento alargado. Além disso, o menor desempenho de B nas duas densidades testadas pode ter sido agravado pela maior competição intraespecífica. A tendência observada nos valores estimados de NDVI e NDMI reforça a relação entre a densidade de vegetação e o estado de saúde das plantas, destacando o potencial destas métricas para a monitorização remota e gestão agronómica. Assim, os resultados sugerem que a escolha da variedade e o ajuste da densidade devem ser adaptados estrategicamente para otimizar o rendimento da cultura de milho.

3.1. Produtividade

A Figura 3 mostra o número médio de plantas e de maçarocas por parcela, em função da variedade de milho (A e B) e da densidade de sementeira (testemunha, 80 000 e 160 000 plantas/ha). Verifica-se que a variedade A apresenta, em todas as densidades, um número superior de plantas e de maçarocas comparativamente à variedade B. A densidade de 160 000 plantas/ha resultou no maior número de plantas (87 para a variedade A e 79 para a variedade B), assim como no maior número de maçarocas (42 e 33, respetivamente), indicando uma resposta positiva ao aumento da densidade, especialmente na variedade A.

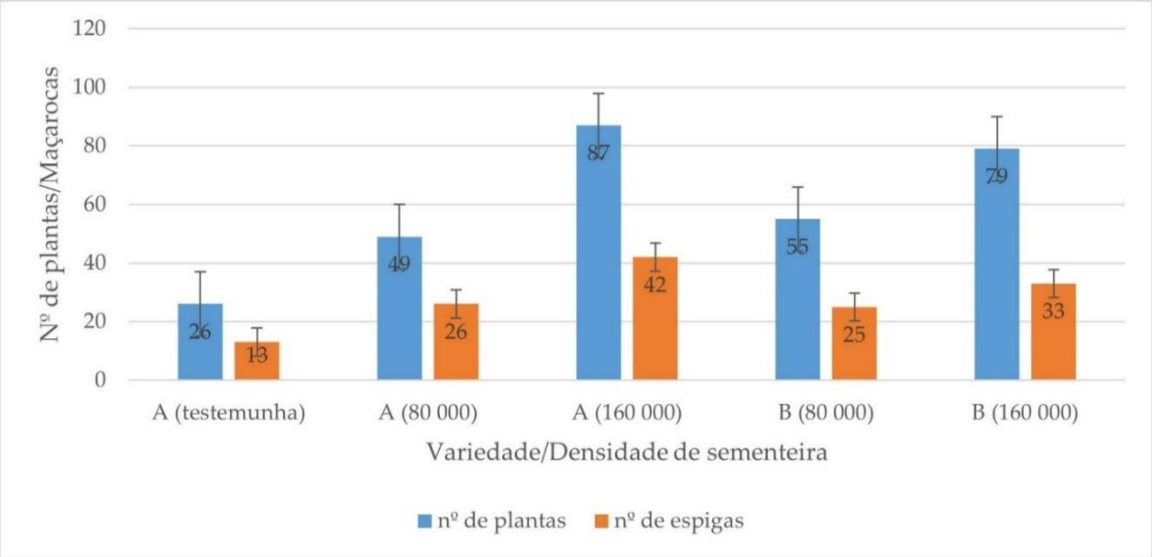


Figura 3. Número médio de plantas e de maçarocas por parcela, em função da variedade de milho (A e B) e da densidade de sementeira (testemunha, 80 000 e 160 000 sementes/ha).

Esta tendência está de acordo com a literatura, que indica que densidades populacionais mais elevadas podem aumentar o rendimento por unidade de área [2]. No entanto, é também importante considerar o risco de competição intraespecífica e limitação de recursos, que podem afetar a produtividade individual das plantas.

A Figura 4apresenta os valores médios de produtividade total (em verde) e corrigida para 14% de humidade (em laranja), para cada combinação de variedade e densidade de sementeira. Observa-se que a variedade A, na densidade de 160 000 plantas/ha, alcançou a maior produtividade total (17 784 kg/ha) e corrigida (15 294,1 kg/ha). A variedade B apresentou produtividades inferiores em ambas as densidades testadas, não ultrapassando os 14 200 kg/ha na produtividade total.

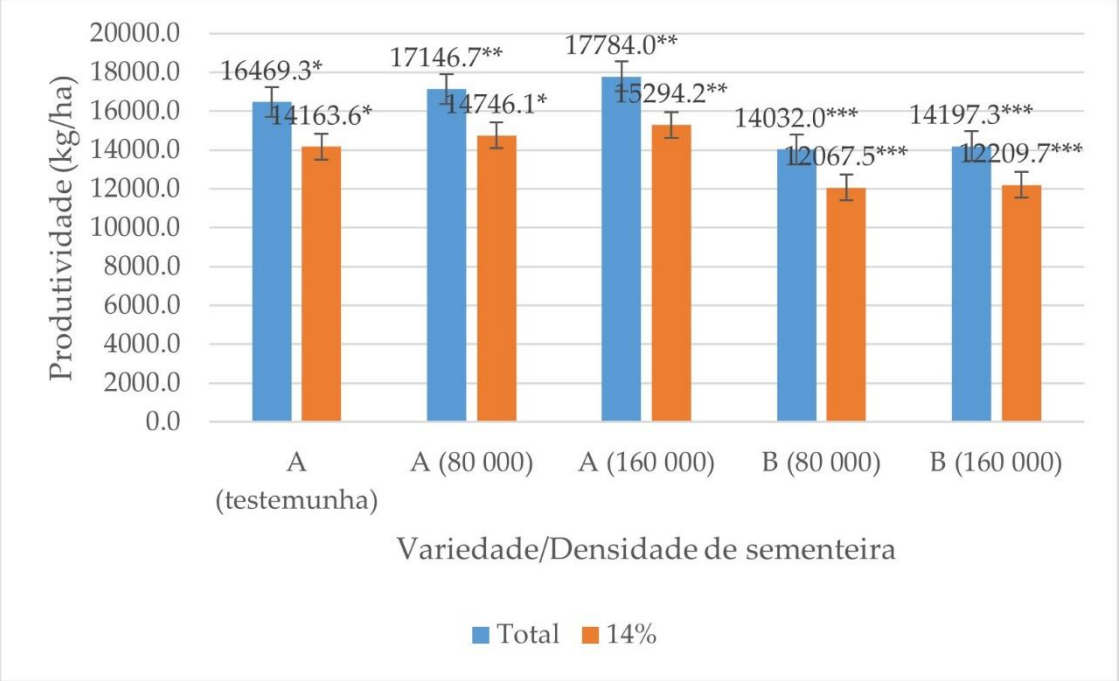


Figura 4. Produtividade total (barras verdes) e ajustada para 14% de humidade (barras laranja) das diferentes combinações de variedade de milho (A e B) e densidade de sementeira (testemunha, 80 000 e 160 000 sementes/ha)..

Os resultados reforçam que o aumento da densidade de plantas, particularmente com a variedade A, está associado a um aumento significativo na produtividade. Este comportamento pode estar relacionado com o melhor desempenho vegetativo e reprodutivo da variedade A, e uma maior eficiência no uso dos recursos disponíveis.

Contudo, importa destacar que as produtividades da variedade B não variaram substancialmente entre as duas densidades (14 032 e 14 197 kg/ha), sugerindo que esta variedade poderá ter um teto fisiológico de produtividade ou menor adaptabilidade ao aumento de densidade.

A análise estatística (indicada pelas marcas de significância nos gráficos) confirma que as diferenças observadas são estatisticamente significativas, reforçando a validade dos efeitos observados.

3.2. Consumo de água

A análise dos índices vegetativos, em particular o NDVI, mostrou variações consistentes entre os diferentes tratamentos. Os valores mais elevados foram observados nas parcelas com densidade de 160 000 plantas/ha, independentemente do espaçamento, sugerindo uma cobertura do solo mais rápida e eficiente. Este dado está alinhado com o NDMI, que também apresentou

melhores valores nestes tratamentos, indicando um bom estado hídrico das plantas, fator crítico sob rega localizada.

A utilização de VANTs permitiu detetar precocemente áreas com menor vigor vegetativo, abrindo espaço para intervenções específicas de rega ou fertilização — uma mais-valia em sistemas de agricultura de precisão.

3.3. Infestantes

Tratamentos com maior densidade de plantas apresentaram menor biomassa de infestantes, confirmando a hipótese de que uma maior competição por luz e espaço pode inibir o crescimento de espécies daninhas. Esta tendência é especialmente relevante no caso de espécies como a Datura stramonium (figueira-do-inferno), cuja presença representa riscos sérios para a saúde humana e animal devido à elevada toxicidade das sementes.

A redução da infestação por via da densidade pode, assim, contribuir não apenas para o aumento da produtividade, mas também para a segurança alimentar e sanitária dos produtos agrícolas — um aspeto pouco explorado, mas de grande importância prática.

O espaçamento entre linhas de 1,50 m, usado nos ensaios I a IV, criou naturalmente mais área de solo exposta à luz solar, o que favorece o desenvolvimento de infestantes (Figura 6). Esta observação é coerente com estudos que indicam que entrelinhas mais estreitas reduzem a emergência de infestantes ao sombreamento mais rápido do solo pela cultura principal. O maior desenvolvimento de infestantes pode ter competido com o milho por recursos como água, nutrientes e luz, explicando a menor produtividade observada nos ensaios com a variedade B, por exemplo.

Os valores mais baixos esperados para os índices vegetativos nas parcelas com maior infestação também refletem esta competição. Como o NDVI e o NDMI são influenciados pela saúde e vigor da cultura principal, a presença significativa de infestantes pode ter "diluído" a leitura da cultura, fazendo os índices parecerem mais baixos do que seriam em condições ideais. Em outras palavras, o sensor pode estar captando vegetação (as infestantes), mas não necessariamente cultura útil, o que interfere na interpretação dos dados remotos.

Este tipo de contraste, entre dados espectrais e observações visuais, destaca a utilidade da deteção remota para identificar zonas problemáticas do campo. Áreas com entrelinha alargada e índice vegetativo inesperadamente baixo podem ser rapidamente sinalizadas como locais com possível pressão de infestantes,

permitindo intervenções mais rápidas e localizadas (ex: mapeamento para aplicação localizada de herbicida ou ajuste no plano de sementeira futuro).

(**a**) (**b**)

Figura 6. (**a**) Entrelinha em solo nu na parcela testemunha (com entrelinha convencional de 0,75 m); (**b**) Entrelinha coberta por infestantes na parcela 1 (com entrelinha alargada, de 1,50 m).

5. Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que a produtividade do milho está fortemente condicionada pela densidade de sementeira e pela variedade utilizada. A variedade A, sobretudo na densidade de 160 000 sementes/ha, apresentou o melhor desempenho, tanto em número de maçarocas como em produtividade ajustada, ultrapassando os 15 000 kg/ha. Em contraste, a variedade B revelou menor adaptabilidade às condições do ensaio, com produtividades significativamente mais baixas, apesar do aumento de densidade. Os índices vegetativos (NDVI e NDMI) acompanharam esta tendência, refletindo maior vigor nas parcelas com maior densidade e melhor desempenho da cultura.

Estes resultados têm aplicabilidade direta na gestão do milho sob rega localizada, mostrando que a escolha da variedade e o ajuste da densidade podem melhorar o rendimento e reduzir infestantes. A monitorização com NDVI e NDMI revelou-se útil para identificar precocemente áreas com menor vigor, permitindo uma gestão mais eficiente e localizada da cultura.

Para investigações futuras, será relevante explorar o comportamento destas variedades em diferentes condições edafoclimáticas e sob outras estratégias de

manejo, incluindo variações na fertilização, rega e controlo de infestantes. A integração de tecnologias de sensoriamento remoto com modelos de predição de produtividade poderá ainda melhorar a eficiência dos sistemas de produção. O presente estudo destaca, assim, o potencial da abordagem integrada entre densidade, variedade e tecnologias digitais para um milho mais produtivo e sustentável.

Financiamento: Este trabalho foi financiado por Fundação para a Ciência e Tecnologia I.P. (FCT), 2024.02421.BDANA.

Declaração do Conselho de Revisão Institucional: Não aplicável.

Declaração de consentimento informado: Não aplicável.

Declaração de disponibilidade de dados: In this section, please provide details regarding where data supporting reported results can be found, including links to publicly archived datasets analyzed or generated during the study.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao centro INOVMILHO em Coruche, Portugal, pela cedência dos campos e das culturas experimentais.

Conflitos de Interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses. Os financiadores não tiveram qualquer papel na conceção do estudo; na recolha, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. Wang, Y.; Zhao, C.; Fan, Z.; Gou, Z.; Hu, F.; Yin, W.; Chai, Q. Characteristics of Dry Matter Accumulation and Yield Formation of Dense Planting Maize in Different Row Spacings | 行距及密度影响玉米密植潜力的干物质累积和产量构成机制. Chinese Journal of Eco-Agriculture 2020, 28, 652–661, doi:10.13930/j.cnki.cjea.190852.
2. Baron, V.S.; Najda, H.G.; Stevenson, F.C. Influence of Population Density, Row Spacing and Hybrid on Forage Corn Yield and Nutritive Value in a Cool-Season Environment. Canadian Journal of Plant Science 2006, 86, 1131–1138, doi:10.4141/P05-136.
3. Haarhoff, S.J.; Swanepoel, P.A. Narrow Rows and High Maize Plant Population Improve Water Use and Grain Yield under Conservation Agriculture. Agron J 2020, 112, 921–931, doi:10.1002/agj2.20085.
4. Acciaresi, H.A.; Zuluaga, M.S. Effect of Plant Row Spacing and Herbicide Use on Weed Aboveground Biomass and Corn Grain Yield. Planta Daninha 2006, 24, 287–293, doi:10.1590/s0100-83582006000200011.
5. DGAV; INIAV; ANPROMIS; ANIPLA; IACA Manual de Boas Práticas; Lisboa, 2024;
6. Mohammadi, G.R.; Koohi, Y.; Ghobadi, M.; Najaphy, A. Effects of Seed Priming, Planting Density and Row Spacing on Seedling Emergence and Some Phenological Indices of Corn (Zea Mays L.). Philippine Agricultural Scientist 2014, 97, 300–306.
7. Bai, J.; Zhang, C.; Ding, X.; Zhang, J.; Liu, P.; Ren, B.; Zhao, B. Effects of Row Spacing and Mulching Reflective Film on the Yield and Light Utilization of Summer Maize | 行距配置和覆反光膜对夏玉米产量及光能利用的影响. Scientia Agricultura Sinica 2020, 53, 3942–3953, doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2020.19.008.
8. Sharifi, R.S.; Zadeh, N.N. Effects of Plant Density and Row Spacing on Biomass Production and Some of Physiological Indices of Corn (Zea Maize L.) in Second Cropping. J Food Agric Environ 2012, 10, 795–801.
9. Badua, S.; Sharda, A.; Flippo, D. Sensing System for Real-Time Measurement of Seed Spacing, Depth, and Geo-Location of Corn: A Proof-of-Concept Study. Trans ASABE 2019, 62, 1779–1788, doi:10.13031/trans.13593.

10. Soleymani, A. Corn (Zea Mays L.) Yield and Yield Components as Affected by Light Properties in Response to Plant Parameters and N Fertilization. Biocatal Agric Biotechnol 2018, 15, 173–180, doi:10.1016/j.bcab.2018.06.011.
11. Piao, L.; Zhang, S.; Yan, J.; Xiang, T.; Chen, Y.; Li, M.; Gu, W. Contribution of Fertilizer, Density and Row Spacing Practices for Maize Yield and Efficiency Enhancement in Northeast China. Plants 2022, 11, doi:10.3390/plants11212985.
12. Singh, M.; Thapa, R.; Singh, N.; Mirsky, S.B.; Acharya, B.S.; Jhala, A.J. Does Narrow Row Spacing Suppress Weeds and Increase Yields in Corn and Soybean? A Meta-Analysis. Weed Sci 2023, 71, 520–535, doi:10.1017/wsc.2023.50.
13. Fanadzo, M.; Mashingaidze, A.B.; Nyakanda, C. Narrow Rows and High Maize Densities Decrease Maize Grain Yield but Suppress Weeds under Dryland Conditions in Zimbabwe. Journal of Agronomy 2007, 6, 566–570, doi:10.3923/ja.2007.566.570.
14. Ambrose, A.; Kandpal, L.M.; Kim, M.S.; Lee, W.-H.; Cho, B.-K. High Speed Measurement of Corn Seed Viability Using Hyperspectral Imaging. Infrared Phys Technol 2016, 75, 173–179, doi:10.1016/j.infrared.2015.12.008.
15. Köppen, W. Versuch Einer Klassifikation Der Klimate, Vorzugsweise Nach Ihren Beziehungen Zur Pflanzenwelt. Geogr Z 1900, 6, 593–611, doi:http://www.jstor.org/stable/27803924.
16. Cardoso, J. A Classificação de Solos de Portugal. In Boletim de Solos do SROA; 1974; Vol. 17, pp. 14–46.
17. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing 2023.
18. William Revelle Package Psych 2024.
19. Alexis Dinno Package Dunn.Test 2024.

Uso de Sensores para Avaliação da Refletância Foliar na Fertilização Sustentável em Olival

Catarina Manuelito [1*], Luís Conceição [2], Rocío Calderón [3], António Cordeiro [1], Carla Inês [1] and José Silvestre [4]

1 Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. (INIAV I.P.) – Polo de Elvas, Estrada de Gil Vaz, Apartado 6, 7351-901 Elvas, Portugal; catarina.manuelito@iniav.pt; antonio.cordeiro@iniav.pt; carla.ines@iniav.pt

2 VALORIZA – Research Centre for Endogenous Resource Valorization, Polytechnic Institute of Portalegre. Edíficio BioBIP – Campus Politécnico, 10, 7300-555 Portalegre, Portugal; luis_conceicao@ipportalegre.pt

3 Institute for Regional Development (IDR), Agroforestry and Cartography Precision, Castilla-La Mancha University, Campus universitario s/n, 02071, Albacete, Spain; rocio.arias@uclm.es

4 INIAV I.P., Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Polo de Inovação de Dois Portos, Quinta da Almoinha, 2565-191 Dois Portos, Portugal; jose.silvestre@iniav.pt

* Correspondence: catarina.manuelito@iniav.pt

Abstract: A intensificação da olivicultura tem levantado preocupações quanto ao uso de água e fertilizantes, principalmente no contexto da estratégia da União Europeia Farm to Fork, que visa reduzir em 50% o uso de pesticidas e diminuir as perdas de nutrientes no solo até 2030. Este ensaio foi conduzido no olival em sebe do INIAV, em Elvas, utilizando três cultivares de oliveira: 'Azeiteira', 'Arbequina' e 'Koroneiki'. Foram implementados tratamentos diferenciados de fertilização por fertirrega e, posteriormente, realizaram-se medições de reflectância das folhas com um sensor multiespectral de baixo custo e um espectrómetro de alta resolução. Durante o período de estudo, foram coletadas 120 amostras, totalizando 14.400 folhas. As leituras de reflectância obtidas com o espectrómetro apresentaram uma boa correlação com os níveis de macronutrientes, especialmente para o Fósforo (R^2 = 0,67) e Potássio (R^2 = 0,60), utilizando modelos de regressão. No entanto, o sensor de baixo custo demonstrou limitações em relação à precisão, indicando a necessidade de mais estudos para sua validação. Os resultados obtidos sugerem que a utilização de tecnologias de deteção proximal pode ser uma ferramenta valiosa para otimizar a fertilização e promover práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental e aumentando a eficiência de produção no olival.

Keywords: deteção proximal; diagnóstico nutricional; eficiência de produção; *Olea europaea* L..

1. Introdução

Na Europa, a área de olival é bastante representativa, ocupando cerca de seis milhões de hectares, sendo os países produtores em que esta cultura tem maior expressão Espanha, Itália, Grécia e Portugal [1]. Nos próximos dez anos, Portugal pretende aumentar a produção de azeitona e, consequentemente, a produção de azeite, ambicionando assim alcançar a terceira posição do ranking de maior

produtor de azeite mundial [2]. No Alentejo, nas últimas décadas e, fruto sobretudo da existência do perímetro de rega do Alqueva, tem ocorrido um aumento da área do olival, quer em modo de produção intensivo quer superintensivo, ocupando assim cerca de 61% deste perímetro de rega, equivalente a 68 659 ha [3]. Ultimamente, o setor agrícola em geral tem vindo a sofrer cada vez mais várias pressões e desafios sociais (aumento da população mundial), ambientais (alterações climáticas) e económicos, como é o caso do aumento do preço dos combustíveis e fertilizantes. Tal obriga à necessidade de produzir mais com menos, incentivando a práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes. Para que tal seja possível a aposta na "agricultura de precisão" e na "agricultura 4.0" é essencial para que se consiga alcançar tamanho objetivo [4]. Importa por isso desenvolver ferramentas que permitam, de uma forma expedita, contribuir para o aumento de eficiência da gestão do olival garantindo a sua maior sustentabilidade. O objetivo deste trabalho foi: (i) validar os dados recolhidos por deteção proximal no espectro do UV a NIR recorrendo a um espectrómetro de elevada resolução (Ocean Insight, Flame-T-XR1) e uso de um sensor de refletância de baixo-custo (18 bandas, das quais 12 são na gama do visível e 6 no NIR), e (ii) utilizar técnicas de machine learning para estimar o teor em macronutrientes principais em folhas de oliveira. Os resultados sugerem que a utilização destas tecnologias pode ser uma ferramenta valiosa para otimizar a fertilização e promover práticas agrícolas mais sustentáveis.

2. Materiais e Métodos

2.1. Caracterização do Ensaio

O presente trabalho desenvolveu-se no âmbito do projeto AI4RealAg – "Soluções de Inteligência Artificial e Data Science para a implementação e democratização da agricultura digital". O ensaio experimental foi implementado na Herdade do Reguengo, no INIAV I.P. – Polo Elvas (38°54'27.6"N 7°08'41.5"W). A Herdade do Reguengo está inserida numa região de clima Mediterrânico, onde os verões se caracterizam por serem quentes e secos e os invernos frios com base na classificação de Koppen-Geijer, caracterizando-se por um clima do tipo "Csa" [5]. Quanto ao tipo de solo onde está implementado o olival em sebe, caracterizam-se por solos "Aac", que são solos "Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Calcários, (Para-Solos Calcários), de textura pesada" e os solos "Ac", que se caracterizam como "Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Calcários, (Para-Solos Calcários), de textura mediana". Os solos "Aac" e "Ac" "idem, com carbonatos" são solos incipientes, onde o processo de formação do solo ainda não atuou tempo suficiente para provocar diferenciações no mesmo, embora em alguns casos já exista alguma acumulação de matéria orgânica à superfície, não muita devido à elevada taxa de mineralização uma vez que há um bom arejamento da camada superior [6]. Este

ensaio decorreu no olival em sebe, que abrange uma área de cerca de 2,77 ha. O olival em sebe apresenta dois compassos de plantação diferentes, 3,75m x 1,80m (C1) e 3,75m x1,35m (C2) e é constituído por 9 variedades (repetidas em ambos os compassos de plantação). Para a realização deste estudo foram consideradas três variedades, mais precisamente uma variedade portuguesa 'Azeiteira' (V1), uma variedade espanhola 'Arbequina' (V2) e uma variedade grega 'Koroneiki' (V3). A razão pela qual se optou pela V1 foi pelo facto de ser uma variedade do país com grande interesse agronómico que convém valorizar e perceber qual o seu comportamento em sebe. No que diz respeito à V2 e V3, por serem variedades que atualmente estão instaladas no olival em sebe e representam grande expressão e interesse em Portugal. Neste ensaio, em julho de 2022, foram implementados três tratamentos de fertilização diferenciada em cada compasso, nomeadamente a Testemunha (T0) e uma Fertilização Superior à Recomendada (T2) no C1, e a Testemunha (T0) e o Recomendado (T1) no C2. Cada tratamento é constituído por 10 blocos. Para realização deste ensaio de fertilização foram formados três tratamentos de fertilização diferenciada estabelecidos em dois compassos. No C2 – T1 de acordo com Veloso et al. [7], o intuito era aplicar cerca de 80-100 kg de N por ha (insuficiente), 30-40 kg de P_2O_5 por ha (suficiente) e 60-90 kg de K_2O por ha (suficiente) (produção esperada de 6-8 toneladas/ha), enquanto que no C1 (T2) o objetivo era aplicar uma fertilização superior à aplicada no T1. Foram recolhidas folhas do terço médio do crescimento do ano de acordo com a metodologia proposta por Veloso et al. [7], quando as oliveiras se encontravam no estado principal 8, tendo como referência a escala BBCH adaptada por Sanz-Cortés et al. [8], mais concretamente num período compreendido de 11/10/2022 a 19/10/2022, que indica que estávamos no estado de maturação dos frutos. O facto de se proceder à recolha do material vegetal nesta fase fenológica justifica-se pela necessidade de recolha de informação nos projetos a decorrer em paralelo no mesmo ensaio. A recolha realizou-se nos 10 blocos em cada tratamento, sendo cada bloco constituído por 2 oliveiras, o que perfaz 20 oliveiras por tratamento. De acordo com a recomendação do laboratório em cada bloco foi efetuada a recolha de 120 folhas, mais concretamente 30 folhas em cada lateral da sebe, perfazendo 60 folhas por oliveira. As folhas recolhidas eram colocadas num saco devidamente identificado. De seguida, o material vegetal era levado para o laboratório e, de maneira a evitar grandes alterações no material vegetal recolhido, as leituras com os sensores eram feitas logo após a sua recolha.

2.2. Metodologia Utilizada na Recolha de Dados com Sensores

Para avaliação de refletância das folhas recorreu-se a dois tipos de sensores, nomeadamente um sensor considerado de baixo-custo (AMS S7265x 18-channel multispectral sensor) desenvolvido pela Universidade de Huelva e um sensor de espectrometria de alta resolução da marca Ocean Insight (FLAME-T-XR1).

Para tal, tivemos em consideração a seguinte metodologia:

- Dispositivo Multiespectral de Baixo-Custo: Num conjunto de 120 folhas devidamente agrupadas foram realizadas 10 leituras em cada conjunto de folhas de cada bloco. Antes de se proceder às leituras, o sensor era calibrado no 'Painel de Refletância Calibrado' da MicaSense (número de série: RP03), onde se realizavam 2 disparos no painel em questão. Voltava a calibrar-se o sensor ao fim de 42 leituras (4 blocos). De referir ainda que, no conjunto de 120 folhas, as 10 leituras eram feitas em locais diferentes do conjunto. À medida que se realizavam as medições, era feito um registo recorrendo ao software Excel (formato .xlsx) onde estava descrito o dia da leitura, a amostra a que correspondia, o bloco, a identificação do documento onde foram armazenados os dados do sensor (criada pelo sensor em formato '.csv' e armazenada no cartão SD) e o número da leitura;

- Espectrómetro de Alta Resolução: Para a recolha dos espectros através deste sensor, foram selecionadas 10 folhas ao acaso do grupo de 120 folhas/bloco e procedia-se à leitura numa folha individual. Foram realizadas 3 leituras por folha, mais concretamente uma leitura perto do pecíolo da folha, outra no centro e, por fim, outra no ápice da folha, de maneira a garantir uma boa representatividade das folhas. Para o funcionamento deste equipamento era necessário proceder à instalação do software OceanART, possuir uma fonte de luz (AvaLight-Hal), a fibra (QR 400–7–SR–BX), o specular reflectance standard (WS-1) para se proceder à calibração do espectrómetro quando iniciado, o suporte da sonda de refleção (RPH-1) e um cabo USB (CBL-MICROTOA-USB) para ligar o equipamento ao computador, onde posteriormente eram registados os dados. Os ficheiros gerados pelo sensor estavam em formato '.tsv'. Indo ao encontro do registo feito para o sensor de baixo-custo, no espectrómetro também se procedia ao registo em Excel (formato .xlsx) onde estava descrito o dia em que foram feitas as leituras com o sensor, a amostra a que correspondia, o bloco e a identificação com o nome do ficheiro criado.

Para proceder às leituras com ambos os sensores, era sempre verificado se a área onde o sensor iria fazer a leitura estava coberta com o material vegetal.

2.3. Preparação das Amostras para Posterior Análise Química

No laboratório, terminadas as leituras com os respetivos sensores, no mesmo dia, procedia-se à preparação do material vegetal para posterior análise química. Para esse efeito era aplicada a metodologia descrita por Galeriani et al. [9], de maneira a evitar que as amostras de material vegetal fossem contaminadas com pó e/ou resíduos de pulverização. O procedimento de lavagem das folhas consistiu em colocar o material vegetal numa solução de água corrente juntamente com o detergente (TFD 4 – Franklab) não iónico, sem fosfatos e, posteriormente, numa solução de água destilada. Após este procedimento o material vegetal foi envolvido com um papel, com o objetivo de retirar a humidade em excesso e, de seguida, as amostras foram colocadas em envelopes devidamente identificados e levadas para a estufa (Thermo Scientific (Heratherm OMS180)) a uma temperatura de 65 ˚C onde permaneciam durante 24 horas. Posteriormente as amostras foram colocadas em caixas e enviadas para o Laboratório Alto Guadalquivir S.L., Labiser, localizado em Córdoba, Espanha, onde foram efetuadas as analises químicas (N, P, K).

3. Resultados

3.1. Análise de Variância (ANOVA) para os macronutrientes principais

No Quadro 1 estão representados os resultados da determinação do one-way ANOVA onde dada uma categoria (ou classe) (variável independente) é verificado se existe diferenças na quantidade do N, P e K (variáveis dependentes). Assume-se que há diferenças entre as categorias (ou classes) quando o p-value é inferior a 0,05.

O Quadro 1 contém os resultados da ANOVA apenas para a classe de tratamento, agrupado por variedade. No que diz respeito à análise realizada para o N, na V1 e V2 existem diferenças estatísticas significativas (p>0,05). Em suma, destes resultados depreende-se que a fertilização não afeta significativamente o N na V3 e o K não apresenta diferenças qualquer que seja a variedade.

Quadro 1. ANOVA para a classe de tratamento, agrupada por variedade.

	N		**P**		**K**	
Variedade	**F statistic**	**p-value**	**F statistic**	**F statistic**	**p-value**	**F statistic**
Azeiteira (V1)	12,20	0,00	6,39	0,00	1,70	0,19
Arbequina (V2)	35,19	0,00	6,95	0,00	2,31	0,11
Koroneiki (V3)	1,40	0,25	11,32	0,00	0,67	0,52

3.2. Tratamento de Dados dos Sensores

Para trabalhar os dados e posteriormente se obterem os resultados recorreu-se à linguagem de programação Python (3.12). Ao termos dados de referência optou-se pela aprendizagem supervisionada e, como a referência são valores contínuos, optou-se pela regressão. Com recurso à biblioteca Scikit-Learn, foram selecionados

cerca de 43 modelos de regressão disponíveis para a aprendizagem automática. Posteriormente, na fase que visa treinar os modelos, disponibilizaram-se 70% dos dados recolhidos aos modelos. De seguida foi feita uma avaliação dos modelos anteriormente treinados com os restantes 30% dos dados recolhidos, que ainda não tinham sido disponibilizados aos modelos, onde se calcularam métricas, como foi o caso do coeficiente de determinação (R^2), e se interpretaram os resultados.

3.2.1. Análise de Componentes Principais (PCA)

Procedeu-se à PCA, com o principal objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados mantendo a maior expressividade dos mesmos. Posto isto, inicialmente foi necessário atribuir o mesmo peso às refletâncias recorrendo ao Z-score para atingir esse objetivo. Posteriormente foram calculadas todas as componentes PCA para os dados em questão. Como as primeiras colunas passam a ter a maior parte da informação, depois dessa transformação foram selecionadas quantas colunas queríamos passar ao modelo com a garantia de que estávamos a passar primeiro as colunas mais importantes. Optou-se por fazer comparações selecionando vários critérios de escolha de componentes principais (baixo, médio e alto), nomeadamente 4, 10 e 20 componentes principais para o espectrómetro e para o sensor de baixo-custo, ao ter comprimentos de onda mais reduzidos, decidiu-se passar ao modelo a informação sem aplicação do PCA, com a aplicação de PCA onde foram disponibilizadas ao modelo 4 componentes principais e a PCA onde todas as componentes foram utilizadas.

3.2.2. Resultados obtidos

Com o principal objetivo de encontrar uma relação entre os dados recolhidos com os sensores e o teor de macronutrientes principais presentes no material vegetal (analisado em laboratório), obtiveram-se os seguintes resultados (R^2) para o espectrómetro FLAME (Quadro 2) e para o sensor de baixo-custo (Quadro 3). Cada linha corresponde a um modelo de regressão diferente e nas colunas estão representadas diferentes parametrizações de pré-processamento, onde os números (4, 10 e 20) indicam a quantidade de componentes principais que foram tidas em consideração e, para o Quadro 3 (sensor de baixo-custo), 'None' indica que não foi aplicado PCA e 'All' indica que o PCA foi aplicado e todos os componentes foram utilizados. Para a elaboração destes Quadros apenas foram tidos em consideração os três melhores modelos para cada macronutriente principal. No que diz respeito ao espectrómetro de alta resolução (Quadro 2), obtivemos os melhores resultados em 20 componentes principais, destacando-se os resultados para o P e K, e no sensor de baixo-custo (Quadro 3), de uma forma geral, nos dados onde todas as componentes principais foram tidas em consideração. Quanto ao N, numa primeira fase os resultados não são muito promissores. No que diz respeito ao P e

K os resultados foram mais promissores e houve uma maior variedade de modelos diferentes a alcançar bons resultados.

Quadro 2. Modelos com melhores resultados do Coeficiente de Determinação (R^2) para o espectrómetro.

	Espectrómetro FLAME (R^2)					
	Modelo \ Componentes PCA	**4**	**Modelo \ Componentes PCA**	**10**	**Modelo \ Componentes PCA**	**20**
Azoto	GradientBoostingRegressor	0,17	ExtraTreesRegressor	0,19	ExtraTreesRegressor	0,27
	MLPRegressor	0,16	GradientBoostingRegressor	0,17	GradientBoostingRegressor	0,26
	ExtraTreesRegressor	0,15	RandomForestRegressor	0,15	RandomForestRegressor	0,26
Fósforo	RadiusNeighborsRegressor	0,51	ExtraTreesRegressor	0,61	KNeighborsRegressor	0,67
	ExtraTreesRegressor	0,49	KNeighborsRegressor	0,59	GradientBoostingRegressor	0,64
	GradientBoostingRegressor	0,48	RandomForestRegressor	0,58	ExtraTreesRegressor	0,64
Potássio	AdaBoostRegressor	0,52	ExtraTreesRegressor	0,56	SVR	0,60
	RandomForestRegressor	0,51	RandomForestRegressor	0,56	ExtraTreesRegressor	0,58
	ExtraTreesRegressor	0,51	GradientBoostingRegressor	0,55	GradientBoostingRegressor	0,57

Quadro 3. Modelos com melhores resultados do Coeficiente de Determinação (R^2) para o sensor de baixo-custo.

	Sensor de Baixo-Custo (R^2)					
	Modelo\ Componentes PCA	**None**	**Modelo \ Componentes PCA**	**4**	**Modelo \ Componentes PCA**	**All**
Azoto	ExtraTreesRegressor	0,29	ExtraTreesRegressor	0,11	ExtraTreesRegressor	0,34
	RandomForestRegressor	0,29	ARDRegression	0,11	RandomForestRegressor	0,30
	GradientBoostingRegressor	0,28	BayesianRidge	0,10	BaggingRegressor	0,27
Fósforo	NuSVR	0,34	ExtraTreesRegressor	0,09	ExtraTreesRegressor	0,39
	ExtraTreesRegressor	0,30	KNeighborsRegressor	0,07	HistGradientBoostingRegressor	0,36
	HistGradientBoostingRegressor	0,26	RandomForestRegressor	0,06	RandomForestRegressor	0,36
Potássio	ExtraTreesRegressor	0,24	ExtraTreesRegressor	0,21	SVR	0,44
	NuSVR	0,24	GradientBoostingRegressor	0,19	NuSVR	0,42
	SVR	0,24	RandomForestRegressor	0,19	KNeighborsRegressor	0,38

4. Discussão e Conclusões

No que diz respeito aos resultados das análises foliares, a V2 apresentou valores de N e P superiores às restantes variedades e, no que diz respeito ao K, a V3 apresentou valores superiores, resultados que a verificarem-se em novos ensaios podem validar a importância da fertilização diferenciada por variedade. No que respeita à avaliação das duas técnicas sensoriais para estimar o estado nutritivo da cultura, embora seja um trabalho preliminar, concluímos que numa primeira abordagem os resultados com o espectrómetro FLAME foram bastante promissores. No que diz respeito ao sensor de baixo-custo é necessário tentar outra abordagem, como por exemplo tentar fazer uma calibração mais minuciosa de acordo com os valores do espectrómetro, mais concretamente perceber como as medições do sensor de baixo-custo variam com as refletância, provenientes do espectrómetro, e possivelmente tentar ajustar as medições do sensor de baixo-custo com as do espectrómetro. Relativamente aos modelos que obtiveram um maior valor de coeficiente de determinação (R^2>0,50) a estimar os macronutrientes principais, destaca-se o KNeighborsRegressor, GradientBoostingRegressor, ExtraTreesRegressor e SVR, no espectrómetro utilizando as 20 componentes

principais. Concluiu-se também que os resultados foram mais promissores na estimativa do P e K do que no N (indo ao encontro do que ocorreu no estudo realizado por Noguera et al. [10] onde avaliaram o estado nutricional das oliveiras por meio de análise e modelagem de imagens multiespectrais recolhidas com UAV), que pode estar relacionado com o facto de os modelos de regressão conseguirem obter uma melhor relação entre os valores das bandas (dados de entrada) e os nutrientes P e K do que para o N.

Referências

1. Pinto, L., Cabral, R., & Gonçalves, J. (2021). Olival Tradicional: situação e perspectivas. InforCNA. Disponível em https://www.inforcna.pt/Media/Files/20211230_20211230ArtigoaecnicoVt107.pdf (consultado a 4 de janeiro de 2023).
2. Nobre, M. (2021). Tudo é Economia: O Olival em Portugal - RTP. AGROPORTAL. Disponível em https://www.agroportal.pt/tudo-e-economia-o-olival-em-portugal/ (consultado a 4 de janeiro de 2023).
3. EDIA. (2021). Relatório da Campanha de Rega | 2020. EDIA - Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A.. Disponível em https://www.edia.pt/wp-content/uploads/2021/02/RELATORIOCAMPANHA2020_PERIMETROSALQUEVA.pdf (consultado a 20 de janeiro de 2023).
4. Dores, R. (2021). A revolução digital na agricultura à boleia de drones e satélites. Diário de Notícias. Disponível em https://www.dn.pt/sociedade/a-revolucao-digital-na-agricultura-a-boleia-de-drones-e-satelites-13343860.htm (consultado a 10 de agosto de 2023).
5. IPMA. (2023). Normais Climatológicas. IPMA. Disponível em https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/ (consultado a 13 de agosto de 2023).
6. Cardoso, J. (1965). Os solos de Portugal - Sua classificação, caracterização e génese (I - A Sul do Rio Tejo) [The soils of Portugal - Their classification, characterization and genesis (I - South of the Tejo River)]. Secretaria De Estado Da Agricultura, Direção-Geral Dos Serviços Agrícolas. Disponível em https://www.dgadr.gov.pt/mediateca?task=download.send&id=401&catid=48&m=0
7. Veloso, A., Sempiterno, C., Calouro, F., Rebelo, F., Pedra, F., Castro, I., Gonçalves, M., Marcelo, M., Pereira, P., Fareleira, P., Jordão, P., Mano, R., Fernandes, R. (2022). Manual de fertilização das culturas. INIAV. Disponível em https://www.iniav.pt/images/publicacoes/livros-manuais/Manual_Fertilizacao_das_culturas.pdf (consultado a 12 de agosto de 2023).
8. Sanz-Cortés, F., Martinez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., & Meier, U. (2002). Phenologic growth stages of olive trees. ResearchGate. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/229728173_Phenological_growth_stages_of_olives_trees_Olea_Europaea (consultado a 20 de dezembro de 2022).
9. Galeriani, T., Cosmo, B., & Beneton, A. (2020). Preparo de amostras de tecido vegetal. FCAV / Unesp. Disponível em https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/laboratoriodematologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202013.pdf (consultado a 12 de agosto de 2023).
10. Noguera, M., Aquino, A., Ponce, J., Cordeiro, A., Silvestre, J., Calderón, R. A., Marcelo, M., Jordão, P., & Andújar, J. (2021). Nutritional status assessment of olive crops by means of the analysis and modelling of multispectral images taken with UAVs. ScienceDirect. Disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511021002191 (consultado a 4 de janeiro de 2023).

Combinação de sensores próximos para avaliação da produtividade e da qualidade da pastagem: Altura comprimida × NDVI

João Serrano [1,*]

1 MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development, CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal;

* Correspondence: (J.S.) jmrs@uevora.pt;

Resumo: Este estudo avaliou dois sensores próximos complementares, um medidor de prato ascendente ("Rising Plate Meter", RPM) e um sensor ótico ativo ("Active Optical Sensor", AOS) para obter a disponibilidade de proteína bruta (PB) em termos de kg ha^{-1}, como um indicador global (de produtividade e de qualidade) da pastagem. A componente de produtividade é aferida pela altura comprimida da pastagem, medida pelo RPM (H_{RPM}), enquanto a componente da qualidade é aferida pelo índice de vegetação de diferença normalizada ("Normalized Difference Vegetation Index", NDVI), medida pelo AOS. O trabalho experimental foi desenvolvido numa pastagem de sequeiro biodiversa representativa da região Alentejo, e consistiu em medições dos sensores, seguidas da recolha de 144 amostras de pastagem realizadas em três datas do ciclo vegetativo de 2023/2024. Estas amostras foram submetidas a análises laboratoriais para determinar a matéria seca (MS) e a PB das amostras. As medições dos sensores e os valores das determinações laboratoriais foram usados para desenvolver modelos de estimativa. As melhores correlações entre a PB (kg ha^{-1}) e o índice de produtividade e qualidade da pastagem (IPQP = H_{RPM} × NDVI) foram obtidas nas fases iniciais do ciclo vegetativo da pastagem (Outono: R^2 = 0,86; e Inverno: R^2 = 0.74). Os resultados deste estudo mostram o interesse em alargar a base de dados a outros tipos de pastagem e o potencial para o desenvolvimento de ferramentas para apoio à monitorização da evolução da pastagem e à tomada de decisões de gestão do pastoreio (encabeçamentos, suplementação ou rotação de animais entre parques).

Palavras-chave: agricultura de precisão; Montado; prato compressor ascendente; sensor ótico; indicador global.

1. Introdução

Nos sistemas de pecuária extensiva da Península Ibérica, as pastagens são a principal fonte de alimentação dos ruminantes, especialmente dos ovinos e bovinos de carne [1]. A disponibilidade de pastagem, expressa em termos de matéria seca por unidade de área (MS, em kg ha^{-1}), e a qualidade da pastagem, expressa em termos de proteína bruta (PB, em %), são dois parâmetros fundamentais para os

decisores nos sistemas de produção animal, nomeadamente nas estratégias de pastoreio em termos de gestão do encabeçamento, suplementação ou rotação de animais entre parques de pastoreio [2].

Medições ou estimativas frequentes e exatas da disponibilidade e da qualidade das pastagens são fundamentais para otimizar as decisões de gestão [3]. A aplicação de tecnologias de agricultura de precisão (AP) às pastagens é, contudo, um desafio de grande complexidade, especialmente devido à elevada diversidade e variabilidade espacial, acentuada por forte dinâmica temporal [4].

Existem muitos estudos publicados nos últimos vinte anos sobre a avaliação de tecnologias para estimar e monitorizar a disponibilidade das pastagens [2,5-8], alguns dos quais utilizam sensores próximos ou de contacto. O medidor de prato ascendente (RPM) é o sensor mais utilizado em vários países, como o Chile e a Nova Zelândia [7], a Austrália [8,9], ou a Irlanda [3,10]. O RPM regista uma medida combinada da altura e da densidade da pastagem, designada por altura comprimida (H_{RPM}), utilizando um disco ligado a um bastão graduado [3] e, com base nessa medição, estima a MS [11]. O fabricante deste equipamento (RPM "Jenquip EC20"), por exemplo, propõe uma equação genérica (anual) (Equação (1)), ajustável à evolução do ciclo vegetativo (variação sazonal) numa base mensal [9]. Estão disponíveis comercialmente equipamentos com tecnologia sem fios, de curto alcance ("Bluetooth"), a qual permite transferir dados do medidor para o telemóvel. Esta tecnologia simplifica e automatiza a recolha de dados, podendo associar-se a ferramentas de apoio à decisão baseadas na internet [11].

$$MS = \mathrm{H_{RPM}} \times 140 + 500 \qquad (1)$$

Onde MS é a produtividade em termos de matéria seca (em kg ha^{-1}) e H_{RPM} é a altura comprimida (em cm) medida pelo RPM.

De acordo com Murphy *et al*. [12], os parâmetros importantes para avaliar a qualidade da pastagem em sistemas de pastoreio são a MS, a digestibilidade da matéria seca, a energia metabolizável, a digestibilidade da matéria orgânica, a proteína bruta (PB) e os hidratos de carbono solúveis em água. Para Lugassi *et al*. [13], a composição química, o teor de água e a concentração de nutrientes são amplamente utilizados como indicadores do valor nutritivo das pastagens. O teor de PB e de fibra em detergente neutro (NDF) destacam-se entre os parâmetros químicos mais comuns para efeitos de avaliação da qualidade das pastagens [13,14]. Um elevado teor de PB e um baixo teor de fibra são caraterísticas de pastagens de elevada qualidade [13-15].

Os métodos convencionais para determinação da qualidade das pastagens requerem o corte de amostras de pastagem e o seu processamento em laboratório, com custos elevados e podendo demorar vários dias [3], o que pode limitar a oportunidade de intervir [14]. A necessidade de reduzir o custo e o tempo associado a estas determinações laboratoriais levou ao desenvolvimento de muitos estudos para avaliar tecnologias que permitam a estimativa rápida da qualidade das pastagens. As tecnologias mais comuns baseiam-se na espetroscopia de infravermelhos próximos (NIRS) ou em sensores óticos.

A aplicação da espetroscopia NIR em pastagens teve lugar tanto em determinações convencionais em laboratório, com equipamento de bancada e pré-processamento físico das amostras de pastagem [16-19], como em determinações *in situ* (no campo) e não destrutivas, com espetrómetros NIR portáteis ("Micro-NIR") [20-22]. Este equipamento NIR (de bancada ou portátil) é, no entanto, dispendioso e requer uma análise complexa de dados multivariados e de modelação (quimiometria) [12], inacessível como meio de apoio corrente à produção animal extensiva [18,19].

Na última década, o acesso à informação sobre a qualidade das pastagens através de sensores óticos hiperespetrais e multiespectrais está ligada em especial à deteção remota (DR) suportada por plataformas instaladas principalmente em drones [23] e satélites [24]. Estes avanços baseados em DR podem oferecer a cartografia das pastagens de alta a moderada resolução e previsão altamente precisa da qualidade das pastagens, mas apresentam algumas limitações. A frequente ocorrência de nuvens [8] durante o período vegetativo das pastagens de sequeiro na região Mediterrânica (outono, inverno e primavera) e a predominância de sistemas agro-silvo-pastoris, onde as pastagens se desenvolvem sob a copa de árvores (Montado de sobreiros e azinheiras, em particular na região do Alentejo), abrem boas perspetivas para sensores próximos ou de contacto, que ultrapassam as dificuldades inerentes à utilização de abordagens de DR [6].

Estão disponíveis tecnologias comerciais de espetros óticos para a medição terrestre da qualidade das pastagens (por exemplo, "GreenSeeker" ou "OptRx"). Estes sensores óticos portáteis são mais acessíveis em termos de custos de aquisição e têm resultados mais fáceis de utilizar do que os sensores NIR portáteis. Os sensores óticos obtêm índices de vegetação através do cálculo do rácio de diferentes espetros de luz [25]. O NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) é um dos índices mais comuns [8,12,25]. O NDVI estima a qualidade da vegetação com base no rácio dos comprimentos de onda da luz vermelha e NIR [12]. O sensor multiespectral "OptRx" (Ag Leader, Ames, IA, EUA), por exemplo, emite radiação numa frequência modulada e recebe de volta a radiância nos diferentes canais. Com este sensor, é possível obter as seguintes bandas de radiância: (i)

Vermelho (670 nm); (ii) Red Edge (728 nm); e (iii) NIR (775 nm). O NDVI pode ser calculado com as bandas Red e NIR, utilizando a Equação (2).

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED}} \quad (2)$$

O NDVI é sensível a alterações na maturação das plantas, fator determinante das alterações na concentração de nutrientes e fortemente correlacionado com a PB das pastagens (correlação positiva) e com o NDF (correlação negativa) [26]. O estudo de Serrano *et al*. [6], em pastagens no ecossistema Montado, no Sul de Portugal, mostrou o potencial do sensor "OptRx" com um forte coeficiente de determinação (R^2 = 0,75) entre o NDVI e a PB.

A disponibilidade de pastagem é normalmente expressa em termos de kg de MS por unidade de área (MS, em kg ha^{-1}), e a qualidade da pastagem, por exemplo, em termos de teor de PB, é normalmente expressa em percentagem de MS (PB, em % MS). Como já foi referido, estes são dois parâmetros fundamentais para os decisores nos sistemas de produção animal. A disponibilidade e a qualidade das pastagens de sequeiro são parâmetros que apresentam um padrão específico ao longo do ciclo vegetativo em condições de clima Mediterrânico, embora com variações interanuais, em função da distribuição da precipitação: (i) a MS tende a aumentar desde as primeiras chuvas (geralmente em setembro/outubro) até ao pico da produção outonal (geralmente em novembro ou início de dezembro); a PB é geralmente máxima nesta fase, quando as plantas são jovens (25-30%, dependendo do tipo de pastagem); (ii) entre meados de dezembro e meados de fevereiro, segue-se um período de relativa dormência vegetativa, que corresponde a um crescimento reduzido das pastagens; a PB tende a diminuir nesta fase; (iii) a partir de março e até meados ou final de maio, o aumento gradual da temperatura do ar, desde que acompanhado de precipitação, conduz a um pico exuberante de produção das pastagens (pico de produção primaveril); nesta fase, a PB apresenta uma quebra mais notória, que pode atingir 10-12%; iv) quando as temperaturas elevadas são acompanhadas de reduzida ocorrência de precipitação, o que acontece frequentemente entre o final de maio e o início de junho, a pastagem seca abruptamente, perdendo disponibilidade (MS) e, fundamentalmente, qualidade; a PB atinge valores mínimos de cerca de 5-6%. No entanto, este padrão varia de ano para ano, devido às irregularidades climáticas.

É neste cenário complexo de imprevisibilidade que o agricultor tem de gerir a carga biótica (encabeçamento) e a alimentação/suplementação dos animais, pelo que a disponibilidade de ferramentas que permitam o acesso rápido a informação relevante é fundamental para garantir a sustentabilidade económica e ambiental

destes sistemas de produção extensivos. Uma boa compreensão da dinâmica do ciclo de crescimento das pastagens, da acumulação de biomassa e do valor nutricional é essencial para a sua gestão eficiente [7].

Com base neste pressuposto, este estudo avaliou dois sensores complementares, o medidor de prato ascendente (RPM) e um sensor ótico ativo (AOS), para obter um indicador global, PB em kg ha^{-1}, que integra simultaneamente duas dimensões essenciais, a disponibilidade da pastagem (relacionada com a altura comprimida medida pelo RPM) e a qualidade da pastagem (relacionada com o NDVI medido pelo sensor ótico).

2. Materiais e Métodos

2.1. Campo experimental

As determinações (medições com os sensores e recolha de amostras de pastagem) foram efetuadas durante o período vegetativo de 2023/2024 na parcela "Eco-SPAA" (Figura 1-a), na Herdade da Mitra (Universidade de Évora; 38°53,10 N; 8°01,10 W). Trata-se de uma pastagem de sequeiro plurianual e biodiversa (mistura de várias espécies botânicas: leguminosas, gramíneas, compostas e outras espécies espontâneas), pastoreada por ovinos e integrada no ecossistema Montado, melhorada pela aplicação regular (aproximadamente de 2 em 2 anos desde 2015) de calcário dolomítico. Neste campo, constituído por 4 parques de pastoreio, foram georreferenciadas 48 áreas de amostragem (12 em cada parque), no âmbito de um estudo, iniciado em 2021, sobre sistemas de pastoreio de ovinos (contínuo versus diferido). As áreas de amostragem foram definidas por um especialista em botânica de acordo com a composição florística da pastagem na estação de crescimento anterior.

A composição florística é representativa das pastagens de sequeiro típicas da região, onde predominam as espécies *Erodium mochatum, Diplotaxis catholica, Trifolium repens* e outras espécies espontâneas nativas ou adaptadas ao clima da região. A evolução da pastagem nestas condições de sequeiro é determinada pela distribuição da precipitação e da temperatura, e condicionada pelo pastoreio. A Figura 1-b apresenta os dados de temperatura e precipitação (temperatura média mensal e precipitação) da estação meteorológica de Évora (a cerca de 10 km da Herdade da Mitra) entre julho de 2023 e junho de 2024.

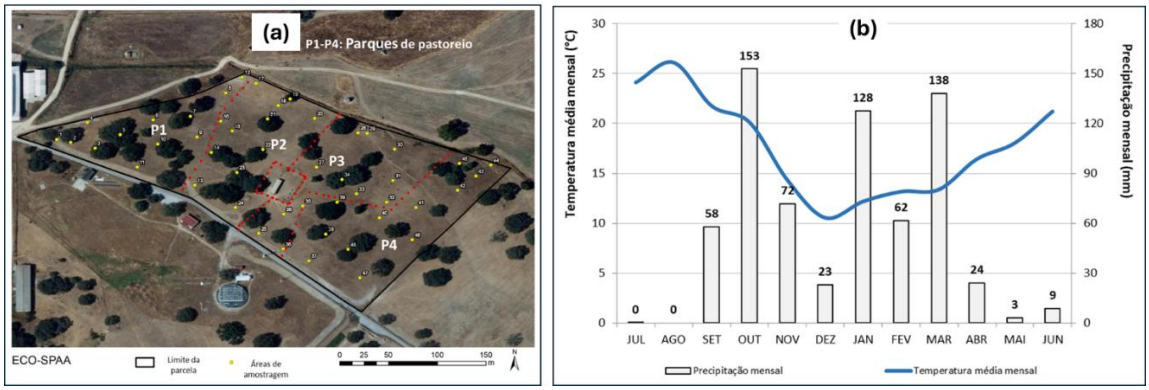


Figura 1. Parcela experimental "Eco-SPAA" e respetivas áreas de amostragem, na Herdade da Mitra, da Universidade de Évora (a); gráfico termopluviométrico da estação meteorológica de Évora entre julho de 2023 e junho de 2024 (b).

2.2. Equipamento utilizado

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um medidor de prato ascendente (RPM), "Jenquip EC20 (Jenquip, 21 Darragh Road, Feilding, New Zealand; Figura 2-a) para medir a altura comprimida da pastagem (H_{RPM});
- Um sensor ótico próximo ativo "OptRx" fabricado pela Ag Leader (2202 South Riverside Drive, Ames, IA 50010, EUA; Figura 2-b);
- Um recetor Trimble GNSS, GeoExplorer série 6000, modelo 88951, com precisão submétrica (GmbH, Am Prime Parc 11, 65479 Raunheim, Alemanha: Figura 2-c);
- Aros metálicos de 0,50 m por 0,50 m para delimitar as áreas de amostragem de pastagem;
- Tesouras elétricas portáteis e sacos de plástico para guardar as amostras de pastagem.

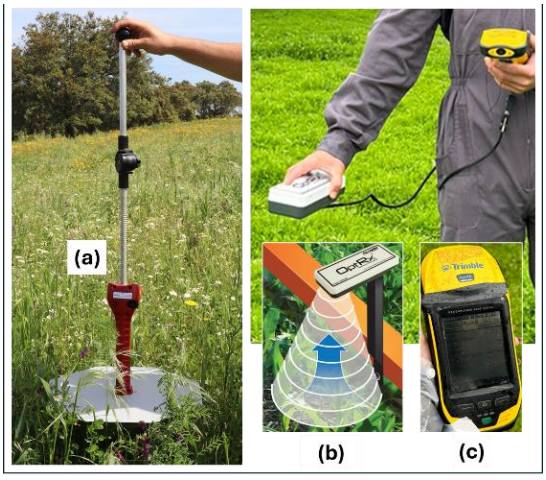


Figura 2. Medidor de prato ascendente (RPM) (a); sensor ótico próximo (b); e recetor GNSS (c).

2.3. Medições, recolha de amostras de pastagem e determinações laboratoriais

As medições foram efetuadas entre dezembro de 2023 e maio de 2024. As medições com os sensores e a recolha das amostras de pastagem nas 48 áreas de amostragem foram realizadas em 3 datas: I-06 de dezembro de 2023 (outono), II-29 de fevereiro de 2024 (inverno), e III-10 de maio de 2024 (primavera).

Foi usado o seguinte procedimento sequencial:

- -Um operador efetuou medições dentro da área de amostragem com o sensor "OptRx" (associado ao recetor GNSS), colocado a cerca de 0,5 m acima da pastagem. Os valores de NDVI foram registados durante um período de 2 minutos, pelo que, em média, em cada data de amostragem, foram efetuadas 120 medições de NDVI (uma por segundo) em cada área de amostragem.
- -Depois do operador do sensor ótico ter terminado a medição em cada área de amostragem, um segundo operador colocou três aros de amostragem (0,5 m × 0,5 m) e efetuou uma medição da altura comprimida (HRPM) com o sensor RPM dentro de cada aro.
- -Um terceiro operador, após as medições com os sensores, procedeu ao corte da pastagem em cada área de subamostragem (de cada um dos 3 aros), sendo a mesma recolhida num saco de plástico, identificado com o respetivo código da zona de amostragem.

Em cada data, estas 48 amostras compósitas de pastagem foram transportadas para o laboratório onde foram pesadas, secas numa estufa e pesadas novamente para obter, respetivamente, a disponibilidade de pastagem em termos de massa de matéria verde (MV) e de massa de matéria seca (MS) por unidade de área, em kg ha^{-1}, e o teor de humidade (em percentagem). As amostras depois de secas foram analisadas para determinar o teor de PB da pastagem (em % da MS) utilizando métodos de referência [27].

2.4. Análise dos dados

Os dados obtidos em cada data foram organizados numa folha de cálculo Excel para calcular parâmetros de estatística descritiva (média, desvio padrão e intervalo de variação).

A proteína bruta (PB), expressa em kg ha^{-1}, foi calculada para cada área de amostragem usando a Equação (3):

$$PB\ (kg\ ha^{-1}) = MS\ (kg\ ha^{-1}) \times PB\ (\%)/100 \quad (3)$$

O índice de produtividade e qualidade da pastagem (IPQP) foi calculado com base na Equação (4):

$$IPQP = H_{RPM}\ (mm) \times NDVI \quad (4)$$

A análise de regressão foi utilizada para avaliar a relação entre as variáveis IPQPI *vs* PB (em kg ha^{-1}). O coeficiente de determinação (R^2) permitiu avaliar a qualidade dos modelos de regressão. Foi também utilizado o "Coeficiente de Correlação de Concordância de Lin" (conhecido como CCL) como medida da precisão e exatidão de cada modelo. O CCL, ao contrário do coeficiente de correlação de Pearson (que apenas avalia as relações lineares e tem em conta a precisão, ou seja, a forma como os valores se correlacionam), tem em conta a dispersão (desvio-padrão) e a exatidão, ou seja, a proximidade entre os valores previstos e os valores observados em termos das respetivas médias. Consequentemente, o CCL fornece uma informação mais abrangente da concordância global do modelo de estimativa [28].

A informação georreferenciada recolhida no campo "Eco-SPAA" nas 3 datas (I, II e III) foi processada com recurso ao software SIG ARCGIS v. 10.5. A análise geoestatística com a extensão "Geostatistical Analyst" foi utilizada para obter os respetivos mapas representando a variabilidade espacial das variáveis de interesse no campo experimental.

3. Resultados

A base de dados deste trabalho encontra-se resumida na Tabela 1. A variabilidade espacial dos vários parâmetros da pastagem medidos por sensores (H_{RPM}, NDVI), calculados a partir destes (IPQP) ou obtidos por análise laboratorial (MV, MS, Hum. e PB) reflete-se no elevado CV, especialmente da MV, da MS, da altura comprimida (H_{RPM}), da PB (em kg ha^{-1}) e do IPQP, da ordem dos 40-70%. Por outro lado, a variabilidade temporal (entre datas de medição) foi também muito significativa, com a MS média a aumentar de 571 kg ha^{-1} em dezembro, para 1834 kg ha^{-1} em fevereiro e 2353 kg ha^{-1} em maio, enquanto a Hum. e a PB da pastagem apresentam uma evolução inversa (Hum.: 89%, 85% e 70%; PB: 24%, 16% e 11%; respetivamente, em dezembro, fevereiro e maio).

Tabela 1. Estatística descritiva (média, desvio padrão e intervalo de variação) dos parâmetros da pastagem.

Data		**I- 06/12/2023**		**II- 29/02/2024**		**III- 10/05/2024**	
Parâmetro da pastagem	n	Média ± DP (CV, %)	Inter. Var.	Média ± DP (CV, %)	Inter. Var.	Média ± DP (CV, %)	Inter. Var.
MV (kg ha^{-1})	48	6254 ± 4274 (68,3)	1423–21090	13256 ± 7054 (53,2)	3867–27917	8245 ± 4759 (57,7)	2580–25037
MS (kg ha^{-1})	48	571 ± 257 (45,0)	237–1703	1834 ± 745 (40,6)	580–3460	2353 ± 1108 (47,1)	933–5400
Hum, (%)	48	89,0 ± 3,3 (3,7)	79,7–93,4	84,6 ± 3,2 (3,8)	75,2–90,5	69,9 ± 6,9 (9,8)	51,9–80,2
PB (%)	48	24,3 ± 5,3 (21,7)	13,5–34,8	16,4 ± 3,6 (21,9)	9,0–23,5	11,3 ± 1,8 (15,7)	8,1–15,4
PB (kg ha^{-1})	48	140,6 ± 75,7 (53,9)	38,8–386,1	305,0 ± 153,3 (50,2)	74,0–626,6	260,6 ±119,4 (45,8)	108,2–650,7
NDVI	2880	0,817 ± 0,057 (7,0)	0,663–0,898	0,762 ± 0,058 (7,6)	0,605–0,840	0,537 ± 0,098 (18,2)	0,313–0,765
H_{RPM} (mm)	144	53,1 ± 35,4 (66,7)	14,0–232,0	103,6 ± 55,3 (53,4)	22,0–244,0	77,8 ± 42,2 (54,2)	22,0–240,0
IPQP	144	44,8 ± 25,1 (56,1)	13,7–108,4	79,2 ± 38,3 (48,4)	21,2–154,5	41,3 ± 20,9 (50,6)	9,1–95,0

n –Número de medições; DP—Desvio padrão; CV—Coeficiente de variação; Inter. Var. – Intervalo de variação; MV—Matéria verde; MS—Matéria seca; Hum.—Teor de humidade da pastagem; PB—Proteína bruta; NDVI—Índice de vegetação de diferença normalizada; H_{RPM}—Altura comprimida, medida pelo prato ascendente; IPQP—Índice de produtividade e qualidade da pastagem.

A evolução da disponibilidade e qualidade das pastagens ao longo do ciclo vegetativo é determinada pelas condições meteorológicas (especialmente temperatura e precipitação) e condicionada pelo maneio do pastoreio (contínuo, diferido, encabeçamento, entre outros aspetos). A Figura 1-b mostra uma distribuição relativamente equilibrada da precipitação no outono e inverno, o que proporcionou condições para uma elevada produtividade das pastagens.

Na relação entre variáveis, a utilização do IPQP, que combina a altura e a qualidade da pastagem, mostrou forte correlação na estimativa da PB em termos de kg ha^{-1} (Figura 3), especialmente na fase inicial (outono; R^2 de 0,86) e na fase intermédia (inverno; R^2 de 0,74) do ciclo vegetativo da pastagem. O IPQP e a PB representam simultaneamente a disponibilidade e a qualidade da pastagem.

A associação de um recetor GNSS a sensores de proximidade ou de contacto permite a georreferenciação da informação de campo. Esta georreferenciação permite a representação em forma de mapa do padrão espacial dos parâmetros da pastagem. A Figuras 4 mostra os mapas que relacionam a PB com o IPQP. Estes mapas captam não só a variabilidade espacial, mas também a evolução temporal da relação entre parâmetros. É ainda evidente que os padrões de variabilidade são mais corretamente captados nas fases inicial (outono) e intermédia (inverno) do

ciclo vegetativo da pastagem, com uma quebra significativa na fase final (primavera).

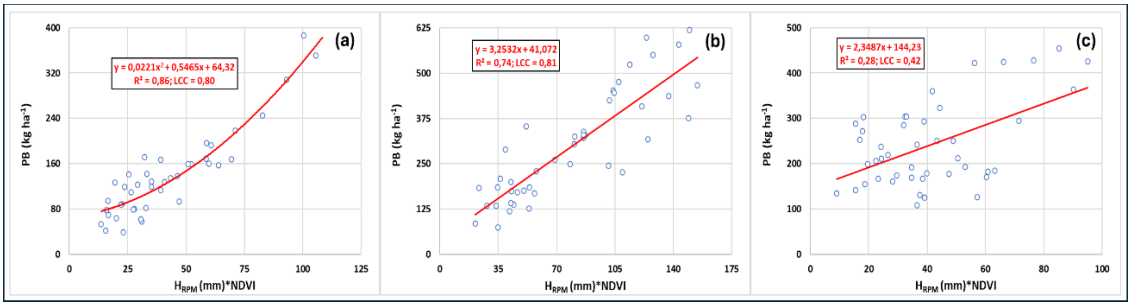


Figura 3. Relação entre a PB da pastagem (em kg ha^{-1}) e o IPQP (=HRPM × NDVI), em dezembro de 2023 (a), em fevereiro de 2024 (b) e em maio de 2024 (c).

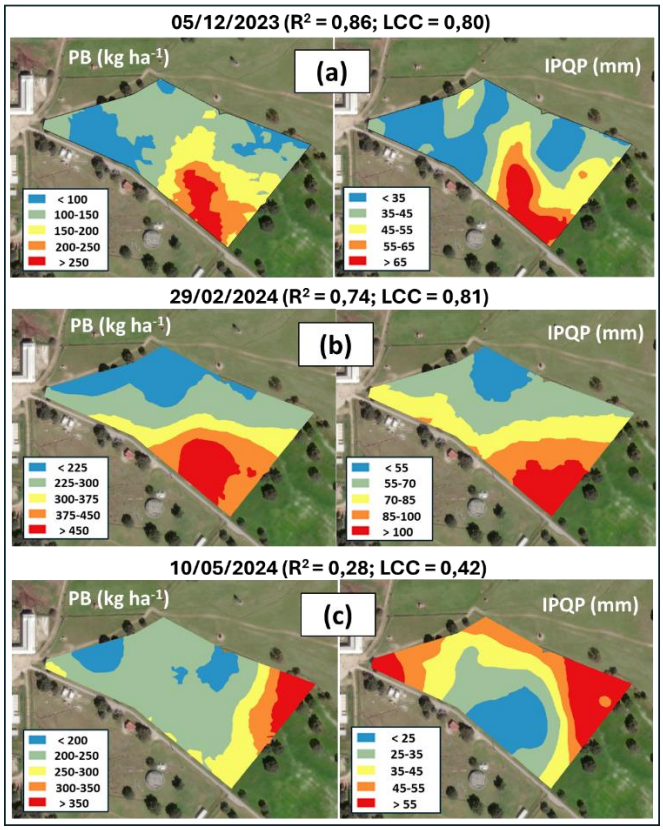


Figura 4. Mapas da PB (em kg ha^{-1}) e do IPQI (=HRPM × NDVI), em dezembro de 2023 (a), em fevereiro de 2024 (b) e em maio de 2024 (c).

4. Discussão

A variabilidade espacial da produtividade e da qualidade é um padrão comum nas pastagens de sequeiro integradas no ecossistema do Montado [1]. Para além da biodiversidade de espécies e famílias botânicas, a presença de árvores e de animais em pastoreio acentua esta variabilidade [4]. Esta variabilidade deve-se a uma série de fatores, incluindo o solo, o ambiente, as alterações sazonais na morfologia da pastagem e a gestão do pastoreio (por exemplo, taxas de encabeçamento, pastoreio

seletivo, etc.) [12]. No nosso estudo, a variabilidade espacial é ainda promovida pela gestão logística do campo experimental no contexto de um projeto de investigação sobre pastoreio de ovinos e correção do pH do solo. O campo foi dividido em quatro parques (P1 a P4, Figura 1-a) de, aproximadamente, 1 ha cada, com dois tratamentos: (i) aplicação versus não aplicação de calcário dolomítico; e (ii) duas intensidades de pastoreio diferentes (taxas de encabeçamento de 1 CN ha^{-1} e 2 CN ha^{-1}). Cada um destes fatores tem um impacto significativo na pastagem [1].

A heterogeneidade aumenta a dificuldade para monitorizar a produtividade e a qualidade da pastagem e exige um grande número de amostras para captar esta variação espacial. Murphy *et al.* [12] sugerem que os locais de amostragem devem ser selecionados aleatoriamente e espacialmente equilibrados. Para efeitos do presente trabalho, o esquema de amostragem foi estabelecido com a georreferenciação de 48 pontos de amostragem (12 em cada um dos quatro parques de pastoreio), definidos por um perito botânico de acordo com a composição florística da pastagem na estação de crescimento anterior. Estes pontos foram mantidos em todas as datas de amostragem das pastagens (outono, inverno e primavera). A fim de minimizar o erro associado às medições de campo [12], a equipa de amostragem no terreno foi também mantida durante todo o período experimental.

Nas pastagens de sequeiro, a evolução da disponibilidade e da qualidade ao longo do ciclo vegetativo (dinâmica temporal) é determinada pelas condições meteorológicas e condicionada pela gestão do pastoreio [1]. No ano agrícola em estudo (2023/2024) a precipitação ocorreu de forma homogénea durante os meses de outono e inverno (cerca de 300 mm de precipitação acumulada no outono - entre setembro e dezembro, e também no inverno - entre dezembro e março; Figura 1-b), o que garantiu quer o primeiro pico de produção no final do outono, quer o máximo de produção acumulada na primavera, fases que determinam em muito o potencial produtivo da pastagem [1]. No nosso estudo, as medições das pastagens foram efetuadas entre dezembro e maio para garantir a representatividade destas fases determinantes do ciclo vegetativo das pastagens.

A abordagem de estimativa baseada na disponibilidade de pastagem (por exemplo, kg de MS ha^{-1}) ou na qualidade (PB, em %) pode ser considerada incompleta. Na prática, o ideal seria uma abordagem que integrasse simultaneamente as duas componentes (disponibilidade e qualidade). Para o efeito, neste estudo, o RPM foi utilizado para estimar a dimensão disponibilidade (MS) com base na altura comprimida (HRPM), e o sensor ótico "OptRx" foi utilizado para estimar a dimensão qualidade (PB) através do cálculo do NDVI. Vários estudos mostraram uma forte

correlação entre o NDVI e a PB [6,29]. Por exemplo, Pullanagari *et al.* [29] obtiveram um R^2 entre 0,65 e 0,83 em pastagens na Nova Zelândia.

O IPQP, obtido do produto entre o H_{RPM} e o NDVI (Equação (4)), mostrou uma precisão muito interessante na estimativa da PB em termos de kg ha^{-1}, especialmente na fase inicial (outono; R^2 = 0,86; LCC = 0,80) e na fase intermédia (inverno; R^2 = 0,74; LCC = 0,81) do ciclo vegetativo da pastagem. Este índice representa simultaneamente a disponibilidade e a qualidade da pastagem, daí o seu potencial prático para utilização na gestão do pastoreio e suplementação em sistemas extensivos de produção animal [30]. Existe potencial para aumentar a produção de pastagem de uma forma sustentável através de uma medição mais precisa da quantidade e qualidade da pastagem [12].

Tendo como referência o trabalho recente de revisão de Murphy *et al*. [12] sobre tecnologias de precisão para a otimização do maneio das pastagens, verifica-se que a avaliação de tecnologias para este efeito tem sido mais intensiva em países com forte vocação para a produção animal, como a Austrália, Nova Zelândia, EUA e, na Europa, a Irlanda, não havendo qualquer referência a trabalhos realizados na Península Ibérica. Relativamente à utilização simultânea dos sensores RPM e "OptRx", não existe publicado nenhum trabalho científico em que estes equipamentos tenham sido testados em pastagens de sequeiro na região Mediterrânica. Por conseguinte, não existem dados que permitam enquadrar os resultados deste estudo, nomeadamente a relação entre o IPQP e a PB em kg ha^{-1}.

A Figura 4 mostra os mapas que relacionam a PB com o IPQP. Estes captam não só a variabilidade espacial, mas também a sua evolução temporal. Os padrões de variabilidade são captados com maior exatidão nas fases inicial (outono) e intermédia (inverno) do ciclo vegetativo da pastagem, com uma quebra significativa na fase final (primavera). A maior precisão obtida nas fases iniciais do ciclo vegetativo pode ajudar o agricultor a decidir quando parar a suplementação alimentar que ocorre durante todo o período de verão (período sem precipitação e, portanto, sem disponibilidade de pasto). Esta representação espacial reforça o interesse na integração de sensores de medição de pastagens com recetores GNSS, uma abordagem que contribui para a interpretação e gestão da variabilidade espacial das pastagens e do pastoreio, permitindo aos agricultores tomar decisões rápidas e mais informadas [2].

Este estudo foi efetuado apenas durante um ciclo vegetativo da pastagem e envolveu um tipo de pastagem, embora representativa das misturas (gramíneas, leguminosas e outras) de pastagens de sequeiro típicas do Montado. É, por isso, fundamental alargar o estudo a mais pastagens, com diferentes caraterísticas e ao

longo de vários ciclos de crescimento das pastagens, para obter mais detalhes e significância sobre os efeitos sazonais [31].

Para além do interesse em mais estudos de calibração/validação destes sensores na gama diversificada de pastagens heterogéneas que são caraterísticas da região, este trabalho abre perspetivas para estudos que potenciem estas tecnologias próximas associando-as à DR, permitindo aos agricultores monitorizar grandes áreas e determinar em tempo real a disponibilidade e a qualidade das pastagens *in situ* , e de forma expedita, com pouca ou nenhuma mão de obra [29] para apoiar a tomada de decisões dos agricultores.

5. Conclusões

O potencial de uma abordagem complementar de multisensores, um RPM, que mede a altura comprimida (H_{RPM}), e um sensor ótico ativo, que mede o NDVI, é demonstrado neste estudo para a obtenção de um índice (IPQP) que integra a produtividade e a qualidade da pastagem, expressa em termos de kg de PB ha^{-1}.

A melhor correlação entre a PB (em kg ha^{-1}) e o IPQP foi obtida nas fases iniciais da estação de crescimento (outono: R^2 = 0,86; LCC = 0,80; e inverno: R^2 = 0,74; LCC = 0,81), o que pode ajudar os agricultores a decidir quando parar a suplementação alimentar que ocorre durante todo o período de verão.

A sazonalidade associada às pastagens de sequeiro afetou decisivamente a precisão da estimativa, tendendo a diminuir drasticamente no final do ciclo vegetativo das pastagens, o que justifica a realização de estudos a longo prazo para recolher mais informações sobre os efeitos sazonais. Estes estudos, para além de incluírem outros tipos de pastagens (composição florística), poderão também substituir os sensores próximos por DR (imagens de satélite), tornando a monitorização das pastagens um processo mais prático e de fácil acesso.

A sensibilização para os benefícios da utilização de tecnologias de AP para a medição frequente e exata da disponibilidade e qualidade das pastagens é uma das principais estratégias para garantir a sustentabilidade económica e ambiental destes sistemas de produção extensivos.

Financiamento: Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) no âmbito do Projeto UIDB/05183 e pelo projeto "SUMO— Sustentabilidade do Montado" (ref. PRR-C05-i03-I000066-LA 6.2).

Declaração do Comité de Ética Institucional: "Não aplicável".

Declaração de Consentimento: "Não aplicável".

Conflito de Interesses: "Os autores declaram não haver conflito de interesses."

Referências

1. Efe Serrano, J. Pastures in Alentejo: Technical Basis for Characterization, Grazing and Improvement; Universidade de Évora—ICAM, Ed.; Gráfica Eborense: Évora, Portugal, 2006; pp. 165–178.
2. Chapa, J.M.; Pichlbauer, B.; Bobal, M.; Guse, C.; Drillich, M.; Iwersen, M. Field evaluation of a rising plate meter to estimate herbage mass in Austrian pastures. Sensors **2023**, 23, 7477.
3. Murphy, D.J.; Shine, P.; O'Brien, B.; O'Donovan, M.; Murphy, M.D. Utilising grassland management and climate data for more accurate prediction of herbage mass using the rising plate meter. Prec. Agric. **2021**, 22, 1189–1216.
4. Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M.; Braun, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. Eur. J. Agron. **2008**, 29, 59–71.
5. Sanderson, M.A.; Rotz, C.A.; Fultz, S.W.; Rayburn, E.B. Estimating forage ass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. Agron. J. **2001**, 93, 1281–1286.
6. Serrano, J.; Shahidian, S.; da Silva, J.M. Monitoring seasonal pasture quality degradation in the Mediterranean montado ecosystem: Proximal versus remote sensing. Water **2018**, 10, 1422.
7. Cárdenas, J.; Balocchi, O.; Calvache, I. Calibration of the rising plate meter for mixed pastures of Ryegrass (Lolium perenne L.) and Kikuyo (Cenchrus clandestinus). Chil. J. Agric. Anim. Sci. **2020**, 36, 216–223.
8. Lawson, A.R.; Giri, K.; Thomson, A.L.; Karunaratne, S.B.; Smith, K.F.; Jacobs, J.L.; Morse-McNabb, E.M. Multi-site calibration and validation of a wide-angle ultrasonic sensor and precise GPS to estimate pasture mass at the paddock scale. Comput. Electron. Agr. **2022**, 195, 106786.
9. Gargiulo, J.; Clark, C.; Lyons, N.; Veyrac, G.; Beale, P.; Garcia, S. Spatial and temporal pasture biomass estimation integrating electronic plate meter, Planet CubeSats and Sentinel-2 satellite data. Remote Sens. **2020**, 12, 3222.
10. O'Donovan, M.; Dillon, P.; Rath, M.; Stakelum, G. A comparison of four methods of herbage mass estimation. Ir. J. Agric. Food Res. **2002**, 41, 17–27.
11. Palma-Molina, P.; Hennessy, T.; Dillon, E.; Onakuse, S.; Moran, B.; Shalloo, L. Evaluating the effects of grass management technologies on the physical, environmental, and financial performance of Irish pasture-based dairy farms. J. Dairy Sci. **2023**, 106, 6249–6262.
12. Murphy, D.J.; Murphy, M.D.; O'Brien, B.; O'Donovan, M. A review of precision technologies for optimising pasture measurement on Irish grassland. Agriculture **2021**, 11, 600.
13. Lugassi, R.; Zaady, E.; Goldshleger, N.; Shoshany, M.; Chudnovsky, A. Spatial and temporal monitoring of pasture ecological quality: Sentinel-2-based estimation of crude protein and neutral detergent fiber contents. Remote Sens. **2019**, 11, 799.
14. Serrano, J.; Shahidian, S.; Paixão, L.; Marques da Silva, J.; Morais, T.; Teixeira, R.; Domingos, T. Spatiotemporal patterns of pasture quality based on NDVI time-series in Mediterranean Montado ecosystem. Remote Sens. **2021**, 13, 3820.
15. Fernández-Habas, J.; Moreno, A.M.G.; Hidalgo-Fernández, M.A.T.; Leal-Murillo, J.R.; Oar, B.A.; Gámez-Giráldez, P.J.; González-Dugo, M.P.; Fernández-Rebollo, P. Investigating the potential of Sentinel-2 configuration to predict the quality of Mediterranean permanent grasslands in open woodlands. Sci. Total Environ. **2021**, 791, 148101.
16. Danieli, P.P.; Carlini, P.; Bernabucci, U.; Ronchi, B. Quality evaluation of regional forage resources by means of near infrared reflectance spectroscopy. Ital. J. Anim. Sci. **2004**, 3, 363–376.
17. Parrini, S.; Acciaioli, A.; Franci, O.; Pugliese, C.; Bozzi, R. Near infrared spectroscopy technology for prediction of chemical composition of natural fresh pastures. J. Appl. Anim. Res. **2019**, 47, 514–520.
18. Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques da Silva, J.; Paixão, L.; Carreira, E.; Carmona-Cabezas, R.; Nogales-Bueno, J.; Rato, A.E. Evaluation of near infrared spectroscopy (NIRS) and remote sensing (RS) for estimating pasture quality in Mediterranean Montado ecosystem. Appl. Sci. **2020**, 10, 4463.
19. Serrano, J.; Shahidian, S.; Carapau, Â.; Rato, A.E. Near-infrared spectroscopy (NIRS) and optical sensors for estimating protein and fiber in dryland Mediterranean pastures. AgriEngineering **2021**, 3, 73–91.
20. Berzaghi, P.; Cherney, J.H.; Casler, M.D. Prediction performance of portable near infrared reflectance instruments using preprocessed dried, ground forage samples. Comput. Electron. Agr. **2021**, 182, 106013.
21. Feng, X.; Cherney, J.H.; Cherney, D.J.R.; Digman, M.F. Practical considerations for using the NeoSpectra-Scanner handheld near-infrared reflectance spectrometer to predict the nutritive value of undried ensiled forage. Sensors **2023**, 23, 1750.

22. Tacoma-Fogal, R.; Boggess, M.; Cherney, J.H.; Digman, M.; Cherney, D.J.R. Predicting grass proportion in fresh alfalfa: Grass mixtures using a hand-held near-infrared spectrometer. Crop Sci. **2024**, 64, 2336–2344.
23. Karunaratne, S.; Thomson, A.; Morse-McNabb, E.; Wijesingha, J.; Stayches, D.; Copland, A.; Jacobs, J. The Fusion of spectral and structural datasets derived from an airborne multispectral sensor for estimation of pasture dry matter yield at paddock scale with time. Remote Sens. **2020**, 12, 2017.
24. Punalekar, S.M.; Thomson, A.; Verhoef, A.; Humphries, D.J.; Reynolds, C.K. Assessing suitability of Sentinel-2 bands for monitoring of nutrient concentration of pastures with a range of species compositions. Agronomy **2021**, 11, 1661.
25. Legg, M.; Bradley, S. Ultrasonic arrays for remote sensing of pasture biomass. Remote Sens. **2020**, 12, 111.
26. Reddy, A.R.; Chaitanya, K.V.; Vivekanandan, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. J. Plant. Physiol. **2004**, 161, 1189–1202.
27. AOAC. AOAC Official Methods of Analysis of AOAC International, 18th ed.; AOAC International: Arlington, VA, USA, 2005.
28. Lin, L.; Torbeck, L.D. Coefficient of accuracy and concordance correlation coefficient: New statistics for methods comparison. PDA J. Pharm. Sci. Technol. **1998**, 52, 55–59.
29. Pullanagari, R.R.; Yule, I.J.; Tuohy, M.P.; Hedley, M.J.; Dynes, R.A.; King, W.M. Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectral radiometry. Grass Forage Sci. **2012**, 68, 110–119.
30. Serrano, J.; Shahidian, S.; Paixão, L.; Marques da Silva, J.; Paniágua, L.L. Pasture quality assessment through NDVI obtained by Remote Sensing: A validation study in the Mediterranean silvo-pastoral ecosystem. Agriculture **2024**, 14, 1350.
31. Murphy, D.J.; O'Brien, B.; Hennessy, D.; Hurley, M.; Murphy, M.D. Evaluation of the precision of the rising plate meter for measuring compressed sward height on heterogeneous grassland swards. Precis. Agric. **2021**, 22, 922–946.

Spatio-temporal analysis of the population dynamics of the codling moth in a large fruit-growing area to obtain improved spatial-wide-scale warning maps

Ouijdan Hajjaj [1,*], José Antonio Martínez-Casasnovas [1] and Jaume Arnó [1]

1 Research Group on AgroICT & Precision Agriculture (GRAP), Universitat de Lleida – Agrotecnio Center, Av. Alcalde Rovira Roure, 191, 25198, Catalonia, Spain; jaume.arno@udl.cat; joseantonio.martinez@udl.cat

* ouijdan.hajjaj@udl.cat

Abstract: The objective of this research was to: i) evaluate the use of geostatistical techniques to generate pest maps and derive risk maps based on the spatial distribution of the codling moth (*Cydia pomonella* L.); ii) analyze the climatic factors that could be related to the spatial distribution of the pest. To this end, weekly captures from a network of 505 pheromone traps in apple orchards in a fruit-growing area of Lleida (Catalonia, NE Spain) during the 2022 and 2023 campaigns were used. A variographic analysis of the captures was performed, generating weekly maps using block kriging (April-October). Logistic regression was applied to evaluate the effect of climate on the population dynamics of the codling moth. Validation of the logistic model predictions against actual field capture data allowed for the adjustment and refinement of the climate response parameters for *C. pomonella*. The alert maps were obtained from the reclassification of the pest maps, taking into account the risk (uncertainty) of exceeding the treatment threshold.

Keywords: alert systems in pest control, risk maps, geostatistical techniques for mapping. pest mapping, integrated pest management (IPM), monitoring traps, *Cydia Pomonella* (L.).

1. Introduction

Monitoring programs that collect data on pest abundance form the foundation of many pest management strategies. Implementing these programs over large areas has proven to be an effective approach, achieving excellent control results with minimal damage and a substantial reduction in insecticide use. In such programs, the collection, recording, and flow of information for decision-making are crucial. This requires methodologies that are both biologically reliable and economically sustainable [1].

One of the challenges in implementing an Integrated Pest Management (IPM) program is establishing an effective communication system among participants. Typically, producers, monitors, assistants, and professionals receive information from various sources, such as public extension services, agrochemical companies,

and others [2]. However, obtaining real-time information on the pest risk level within their specific area of influence or across the entire region remains challenging. Geographic Information Systems (GIS) and geostatistical analysis are necessary tools for more efficiently managing the large volumes of data generated by these programs and for improving decision-making in pest control [3]. By mapping data from these programs and analyzing their relationship with various abiotic and biotic factors, it becomes possible to gain valuable insights for predicting population density in unsampled locations, identifying areas with heightened pest risk across broad regions, and forecasting future pest distribution [4].

Given the importance of the incidence of the codling moth (*Cydia pomonella* L., Lepidoptera: Tortricidae) in apple fruit orchards of the middle Ebor Valley (NE Spain), the objective of this research was to evaluate the feasibility of using geostatistics to generate risk maps based on the spatial distribution of this pest, along with an analysis of the climatic factors potentially influencing the pest's population dynamics.

2. Materials and Methods

2.1. Study area and data acquisition

The study was conducted using capture data from a network of 505 delta traps baited with the PHEROCON CM-DA COMBO (TRÉCÉ) pheromone, targeting *C. pomonella*. This trap network spans over 41,000 hectares in the primary apple-producing region of the province of Lleida, Catalonia (NE Spain) (Figure 1). The data consist of weekly captures recorded in commercial apple orchards from April to October, coinciding with the flight cycle of *C. pomonella*, during the 2022 and 2023 crop years.

Climate data were obtained from 30 meteorological stations belonging to the Network of Automatic Meteorological Stations of Catalonia, which were located within and in the surroundings of the study area. The climatic variables considered in the analysis include: average, maximum, and minimum temperatures (°C); average and maximum relative humidity (%); accumulated precipitation (mm); wind speed (m/s); and accumulated degree days, based on the *C. pomonella* agrometeorological model developed by the Meteorological Service of Catalonia.

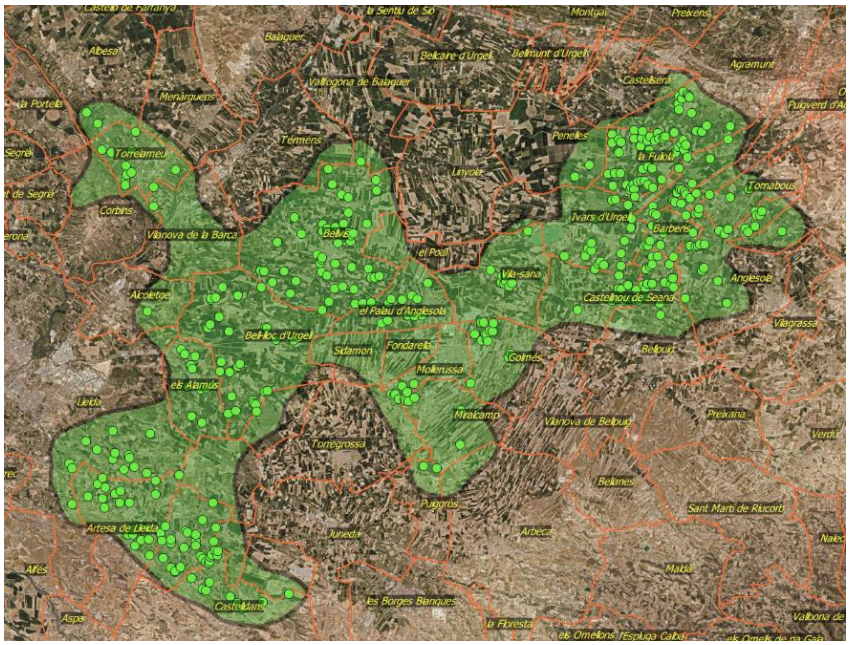


Figure 1. Distribution of the 505 traps network within the study area, covering 28 municipalities in the province of Lleida, Catalonia (NE Spain).

2.2. Map generation

Variographic analysis and mapping were performed using ordinary block kriging based on a local variogram (pest data) or based on global variograms (climatic data). Interpolated data were projected onto a 75 m grid with a block size of 210 m. VESPER 1.6.3 [5] was the geostatistical software used to obtain raster maps.

2.3. Classification analysis of pest capture data

Weekly captures were coded by assigning a value of 0 to traps that did not exceed the treatment threshold (< 3 captures), and a value of 1 otherwise. Additionally, 505 interpolated values for each climatic parameter (from raster maps) were extracted based on the corresponding trap locations. The next step was to address the problem of predicting pest captures posed as a binary response (Y, exceeding or not the treatment threshold) using climatic parameters as predictors (non-collinear X variables). A multivariate logistic regression model [6] was applied (Eq. 1), where $p(X)=Pr(Y=1|X)$ was the probability of exceeding the treatment threshold (≥ 3 captures) given certain values of the predictor variables (climatic parameters, X).

$$log\left(\frac{p(X)}{1-p(X)}\right) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i X_i \qquad (1)$$

The above equation can be rewritten as Eq. 2, allowing the probability to be calculated, once the model coefficients (βi) were estimated using the maximum likelihood method:

$$p(X) = Pr(Y = 1|X) = \frac{e^{\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i X_i}}{1+e^{\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i X_i}} \quad (2)$$

In turn, calculation of odds, p(X)/[1-p(X)], allowed pest-climate interaction to be interpreted in terms of trend and magnitude.

3. Results and discussion

The flight cycle of the codling moth in the study area during the 2022 and 2023 agricultural seasons is depicted in Figure 2. The three adult flights are identifiable, with the first recording the highest number of individuals in both study years. Notably, in 2023, the start of the flight season occurred two weeks earlier than in 2022. The peak of the first-generation flight in 2023 occurred in early May (week 18), while in 2022, it took place in late May (week 22). The peak of the second-generation was observed in late June (week 26) in 2023, compared to late July (week 30) in 2022.

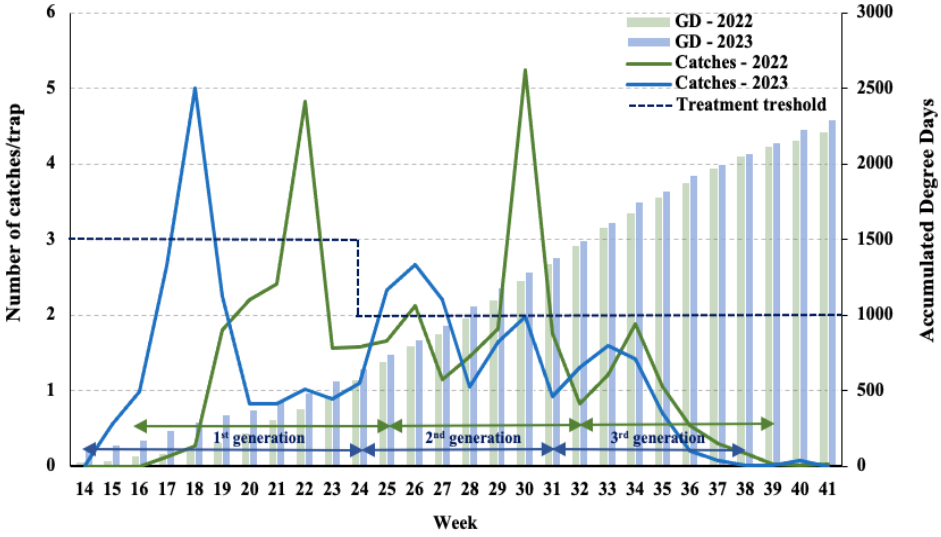


Figure 2. Flight curves according to the average of the 505 traps during the 2022 and 2023 campaign. The horizontal line represents the treatment threshold. Grey columns represent the Accumulated Degree Days.

Figures 3 and 4 illustrate the spatiotemporal evolution of *C. pomonella* throughout its flight cycle (from April to September) in the study area during the 2022 and 2023 agricultural seasons, respectively. The spatiotemporal evolution of the pest shows significant variations from week to week, as the number of captures is influenced by factors such as the pest's biological cycle, the treatments applied, and, particularly, climatic conditions, which exert a considerable influence on its behavior. From these maps, it can be concluded that the application of ordinary block kriging based on a local variogram is an effective tool for predicting population density in unsampled areas and identifying regions with higher pest risk across large geographical areas.

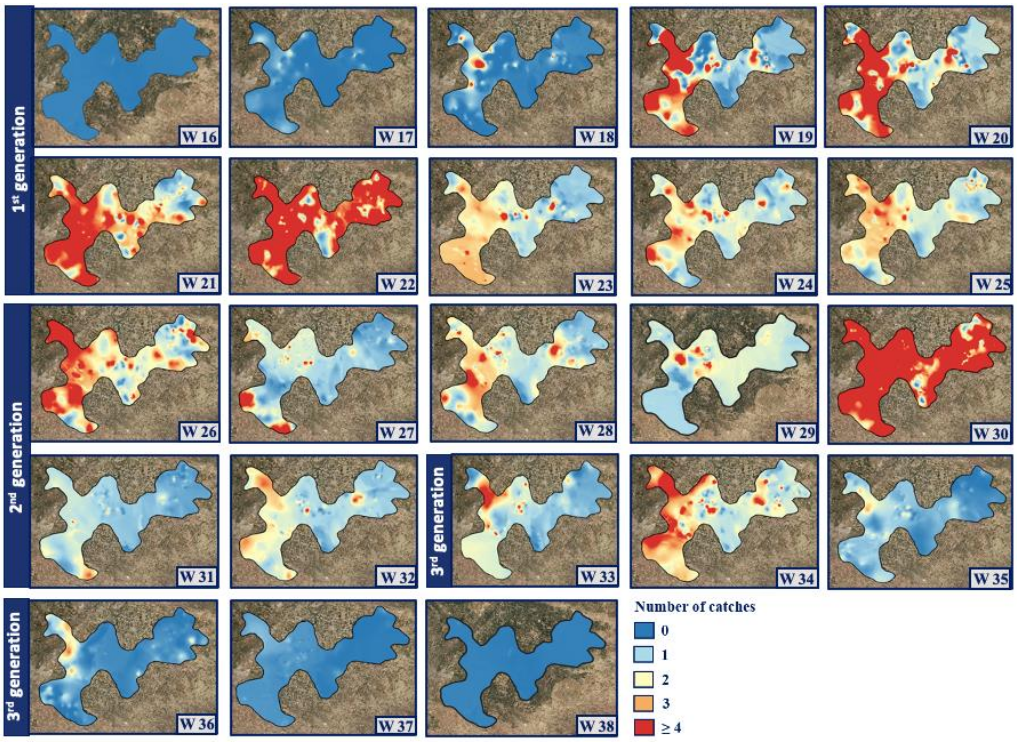


Figure 3. Weekly evolution of the flight activity of *C. pomonella* during the 2022 campaign.

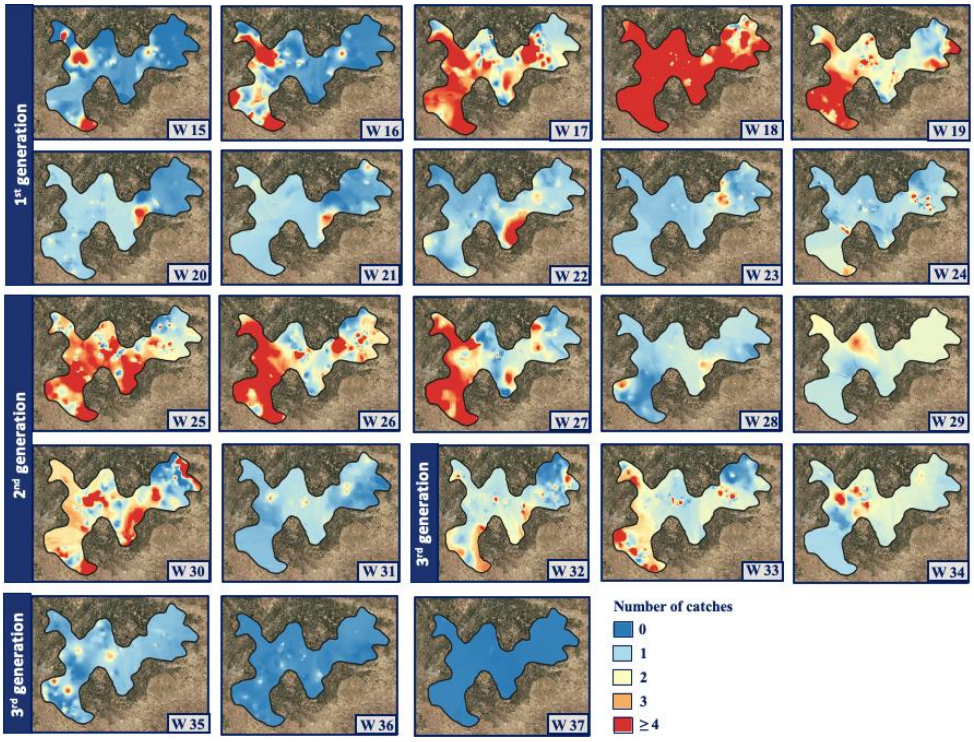


Figure 4. Weekly evolution of the flight activity of *C. pomonella* during the 2023 campaign.

The range of values for the observed meteorological variables was as follows: average temperature: 7.9–30.3 °C; maximum temperature: 13.3–39.7 °C; minimum temperature: -1.1–21.6 °C; wind speed: 0.4–4.5 m/s; precipitation: 0–55.6 mm/week; average relative humidity: 27.7–82.3%; maximum relative humidity: 46–100%;

accumulated degree-days: 7.7–2,426.3 DD. By applying the logistic regression model (Eq. 1), and after eliminating variables with collinearity problems, maximum relative humidity and degree-days were identified as the key variables providing highly satisfactory classification results. Used in combination (maximum relative humidity and degree-days), the model sensitivity (true positive rate) reached a remarkable 90 %, indicating that the model correctly classified 90 % of the traps with adult codling moth captures equal to or greater than the treatment threshold. The probability of exceeding the treatment threshold (≥ 3 captures) could be calculated by applying Eq. 2 as Eq. 3,

$$p(X) = Pr(Y = 1|X) = \frac{e^{-10.42-0.07\cdot Hr+0.02\cdot DD}}{1+e^{-10.42-0.07\cdot Hr+0.02\cdot DD}} \quad (3)$$

where Hr represents the maximum relative humidity (%) and DD represents the accumulated degree-days. The complete estimation results are presented in Table 1.

Table 1. Coefficients of the multivariate logistic regression model.

Variable	Estimate	Std. Error	z value	P(>|z|)
DD	0.02	0.004	4.28	$1.89\cdot10^{-5}$
Hr	-0.07	0.027	-2.59	$9{,}54\cdot10^{-3}$
Intercept	-10.42	2.316	-4.50	$6.91\cdot10^{-6}$

The model indicates that maximum relative humidity reduces the likelihood of surpassing the treatment threshold, whereas accumulated degree days increase this probability. Both factors demonstrate statistically significant effects. Specifically, for each 1-unit increase in maximum relative humidity, the probability of exceeding the treatment threshold decreases by 6.8 %. Conversely, for each 1-unit increase in accumulated degree days, the probability of exceeding the treatment threshold rises by 1.9 %.

Based on the results obtained, three main approaches for developing risk maps are identified: i) reclassification of the maps generated using block kriging and local variograms, based on whether the number of predicted catches exceeds the treatment threshold. This approach allows for direct classification of risk areas based on catch predictions, identifying those areas that require intervention; ii) inclusion of uncertainty in the reclassified maps using the standard error of prediction. This method adds an additional layer of reliability, allowing for a more conservative approach that minimizes the risk of "false negatives," i.e., avoiding the omission of necessary treatments when the threshold has already been exceeded, even though the initial predictions do not reflect this; iii) application of logistic

regression with climate data as predictor variables to make future predictions about the risk of exceeding the treatment threshold.

Figure 5 validates these approaches by developing risk maps using catch data obtained during the peak flight of the second generation of the 2023 campaign. The figure shows an increase in the treatment area when incorporating uncertainty and applying the logistic regression-based model, reflecting a more conservative approach to risk management. The methodology used to obtain risk maps will depend on the level of pest incidence in the study area, considering both the economic and yield impacts as well as the pest management objectives.

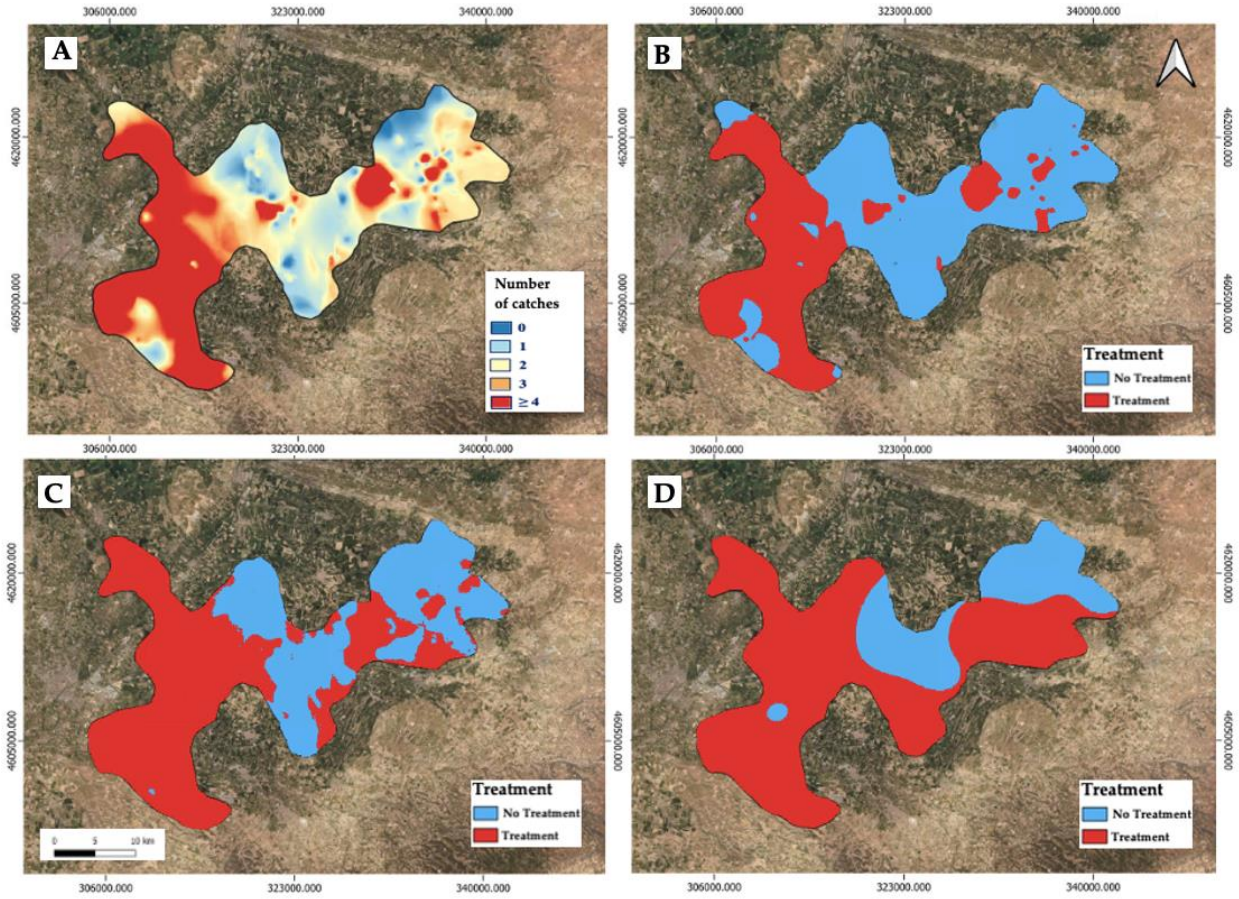


Figure 4. Risk maps developed using catch data from the 2023 second-generation peak flight. **(A)** Map created using block kriging and local variograms. **(B)** Reclassification of the previous map based on the treatment threshold. **(C)** Inclusion of the standard error of prediction. **(D)** Logistic regression using climate data to predict future risks.

5. Conclusions

Maps generated using block kriging and local variograms are effective tools for developing risk maps for large-scale monitoring programs. Including the standard error of prediction improves map reliability and reduces the risk of false negatives, avoiding the omission of necessary treatments. Logistic regression, by integrating climate data as predictor variables, is presented as a useful tool for predicting the future risk of exceeding the treatment threshold. The developed model has identified that maximum relative humidity and degree-days are significantly associated with the risk of exceeding the threshold, suggesting that an increase in degree-days increases the probability of exceeding the threshold, while maximum relative humidity reduces it.

6. Acknowledgements

The present study is part of the PAgPROTECT project PID2021-126648OB-I00 funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation /AEI /10.13039/501100011033 /FEDER, UE. We also thank the Secretariat of Universities and Research of the Department of Universities and Research of the Generalitat de Catalunya and the European Social Fund Plus for the pre-doctoral scholarship of Ms. O. Hajjaj - AGAUR-FI program (2024 FI-3 00065) Joan Oró.

References

1. Bajwa, W.I., Coop, L. and Kogan, M. (2003). Integrated pest management (IPM) and internet-based information delivery systems. Neotrop Entomol 32:373–383
2. Fernández, D., Sinnott, F., Cichón, L., Garrido, S., Muñoz, M., Menni, F., García –Barros, A., Ribes-Dasi, M., and Avilla, J. (2012). Selección de una grilla de trampas para la implementación de un sistema de vigilancia y monitoreo de carpocapsa [*Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae)] en programas de control de grandes áreas. Rev. Invest. Agropec.
3. Dminić, I., Antonela, K., Renata, B. and Igrc-Barčić, J. (2010). Geographic information systems (GIS) and entomological research: A review. Journal of Food Agriculture and Environment, 8, 1193-1198.
4. Rincon, D.F., Esch, E.D., Gutierrez-Illan, J., Tesche, M. and Crowder, D.W. (2024). Predicting insect population dynamics by linking phenology models and monitoring data. Ecological Modelling, 493, 110763.
5. Minasny, B., McBratney, A.B., and Whelan, B.M. (2005). VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006.
6. James, G., Witten, D., Hastie, T. and Tibshirani, R. (2021). An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. (2th ed.) Springer Texts in Statistics.

Pest Patterns Uncovered: Dynamic Spatiotemporal Modeling of BMSB in Emilia-Romagna

Luis Grilo[1,2,6*], José Rafael Silva[2,5], Lara Maistrello[3], Elena Costi[3], Cristina M. Pinotti[4], Manuela Simões[1], José Almeida[1]

1 Earth Sciences Department, FCT-NOVA University of Lisbon, Portugal

2 Department of Rural Engineering, University of Évora, Portugal

3 Department of Life Sciences, University of Modena and Reggio Emilia, Italy

4 Department of Computer Science and Mathematics, University of Perugia, Italy

5 Agroinsider Lda, PITE, R. Circular Norte, NERE, Sala 18, 7005-841 Évora, Portugal

6 InnovPlantProtect, Elvas, Portugal

* lmmgrilo@gmail.com

Abstract: The brown marmorated stink bug (*Halyomorpha halys*), a highly polyphagous insect native to eastern Asia, has become a major invasive species worldwide, significantly impacting agricultural production. In Italy, its population surged in 2019, causing an estimated 600 million euros in damage to orchards. Various control strategies, including chemical and biological approaches, have been implemented to target specific stages of its short life cycle in areas where it is present. This study introduces a spatiotemporal model developed using the direct sequential simulation method over three years (2020–2022) in Emilia Romagna, northern Italy. Weekly pest monitoring data from traps across the region, focusing on the second and third instar nymphs, served as conditioning information. The direct sequential simulation method proved highly effective in integrating temporally dense yet spatially scattered data without introducing artifacts. Additionally, the model accurately handles sudden shifts between zero and non-zero counts. This approach enhances spatial and temporal planning for pest control measures, optimizing the application of chemical and biological interventions. Furthermore, it provides predictive insights into potential infestation hotspots for future years, supporting proactive management strategies.

Keywords: Agriculture Pests, Brown Marmorated Stink Bug, Spatiotemporal Model, Variograms, Direct Sequential Simulation.

1. Introduction

Halyomorpha halys (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae), commonly referred to as the Brown Marmorated Stink Bug (BMSB), is a highly polyphagous insect, indigenous to eastern Asia which established itself globally as a pervasive invasive species [1]. The first instances of BMSB appearing in Italy were documented in Emilia Romagna, a key fruit cultivation region in Europe. In 2016, this region yielded an annual fruit

production of 1,335,607 tons, as noted by Fanfani and Pieri [2]. The impact of BMSB on fruit production in northern Italy reached its zenith in 2019, with estimated losses approaching 600 million euros, according to data from the Italian Central Statistical Office [3].

In Emilia-Romagna, the threat posed by BMSB is particularly pronounced for pear cultivation. Italy stands out as the foremost pear producer in Europe, and nearly 65% of Italian pears are originated from Emilia-Romagna, as reported by the *Sistema d'informazione Nazionale sull'Agricoltura Biologica* [4]. On average, approximately 150,000 tons of pears are exported to international markets, equivalent to a market value of approximately 160 million euros. All this economic activity is at risk due to the presence of this invasive pest. To control BMSB, the use of broad-spectrum insecticides has increased dramatically, severely disrupting previous integrated pest management (IPM) programs [5]. Alternative approaches such as exclusion netting and behavioural strategies (e.g., attract and kill, trap crop, IPM crop perimeter restructuring) have been attempted, but none have proven to be fully effective and easily applicable in different contexts. Long-term and more sustainable management strategies include biological control, and Italy's recent program to release the egg parasitoid *Trissolcus japonicus*, the largest classical biocontrol initiative ever attempted in Europe, is promising. [6]

Yet, the success of any IPM endeavour hinges on understanding when and where the pest poses the greatest threat to crops. Moreover, the effectiveness of chemical interventions relies on precise targeting of specific life stages, while biological control faces challenges due to the short lifespan and limited distribution of parasitoids. Navigating these complexities is essential to devising comprehensive and sustainable management strategies.

In this context, the objective of this research is to create a spatiotemporal model for the BMSB in the Emilia Romagna region, for years 2020 to 2022. This spatiotemporal model will allow a better understanding of the BMSB's yearly generations and life cycle and will support the determination of the optimal time and location for applying the control measures.

2. Materials and Methods

2.1 Location

This study was carried out in the Emilia-Romagna (ER) region, a northern region of Italy. This region consists of a vast plain that stretches from the Po River in the north to the Apennine Mountains. This plain is characterised by intensive farming, with primary crops including pears (*Pyrus communis*), wine grapes (*Vitis vinifera*), cherry

(*Prunus avium*), apple (*Malus domestica*), apricot (*Prunus armeniaca*), and peach (*Prunus persica*). Additionally, row crops such as alfalfa (*Medicago sativa*), soybean (*Glycine max*), sorghum (*Sorghum bicolor*), sunflower (*Helianthus annuus*), maize (*Zea mays*), and wheat (*Triticum aestivum*).

2.2 Data collection and analysis

2.2.1 BMSB data

The data on BMSB population was obtained through the trap network established by Cimice.net. [7] spanning from 2020 to 2022. This system collected insects weekly across 135 traps, averaging 30 timepoints per year. These pheromones baited traps were strategically positioned in fields near orchards. The collected data then underwent meticulous preprocessing.

Initially, the data was organized chronologically by converting the dates of each week into the corresponding week of the year (WOTY). Next, the dataset was categorized into three classes: "Smalls" for young nymphs (second and third instars), "Larges" for late nymphs (fourth and fifth instars), and "Adults" for mature individuals. Each subset was further segmented based on trap identification numbers and their associated geographic coordinates.

Within Emilia-Romana, a polygon covering 663,746 hectares was defined as the study area (Figure 1). This step aimed to minimize extrapolation, within the selected area encompassing the region where most traps were located.

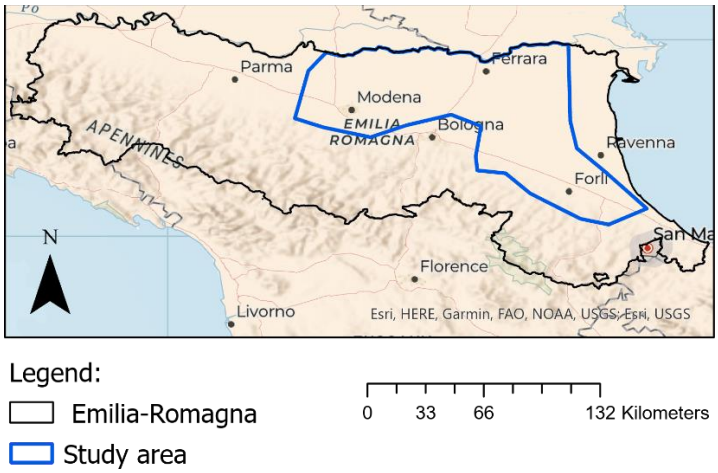


Figure 1. Defined study area in Emilia-Romagna

In this study, geostatistical simulation – particularly direct sequential simulation (DSS) [8] – was favoured over kriging due to its adeptness in handling sparse spatial

data regularly recorded at time intervals. DSS emerged as a preferred method for its seamless integration of weekly count averages within the space-time model.

For each year, a spatiotemporal model was built using the counts from the "Smalls" class, since this category exhibited greater spatial continuity.

The stochastic simulation of images for the studied variables was performed using the DSS method, incorporating the experimental data, variograms, and distribution laws obtained through ordinary kriging (ungrouped distribution laws).

In a general overview, the DSS method can be summarised in the following steps [8]:

1. Choose a random sequence of nodes from a regular mesh that ensures all nodes to be visited once.
2. For each node: x_u, simulate of the value of: $z^s(x_u)$ by:
   i. Perform a simple ordinary kriging estimation to determine the mean $z^*_{sk}(x_u)$ and variance $z_{sk}*(x_u)$ of the variable $z(x)$ at that location x_u.
   ii. Resample the histogram of the variable locally, $z(x_u)$, using techniques such as the Gaussian transformation applied to the working variable.
   iii. Compute the auxiliary variable, $y^*(x_u)$, which represents the transformed variable, for example, applying the equation:

$$y^*(x_u) = \varphi\big(z^*(x_u)\big) \qquad (1)$$

   iv. Generate a random number p from a uniform distribution *U (0,1).*
   v. Generate a value y^s from $G(y^*(x_u),\ \sigma^2_{sk}(x_u))$

$$y^s = G^{-1}\big(y^*(x_u), \sigma^2_{sk}(x_u), p\big) \qquad (2)$$

   vi. Compute the simulated value $z^s(x_u)$ by applying the inverse of the function
   $z^s(x_u) = j^{-1}(y^s)$.

By following these steps, the DSS method enables the stochastic simulation of images for the studied variable, while conditioning the results to the experimental data, variograms, and distribution laws obtained through ordinary kriging.

3. Results

The temporal abundance of BMSB counts across weeks, depicted in Figure 2 for the years 2020, 2021, and 2022, revealed distinct patterns between "Smalls" and "Adults". "Adults" consistently appeared first, followed by "Smalls", persisting later into the season. This pattern aligns with the BMSB lifecycle outlined in the literature [14], where the initial peaks correspond to overwintering adults, while subsequent peaks are associated with the F1 and F2 generations. Specifically, the first and second peaks of the "Smalls" correspond to the F1 and F2 generations, respectively.

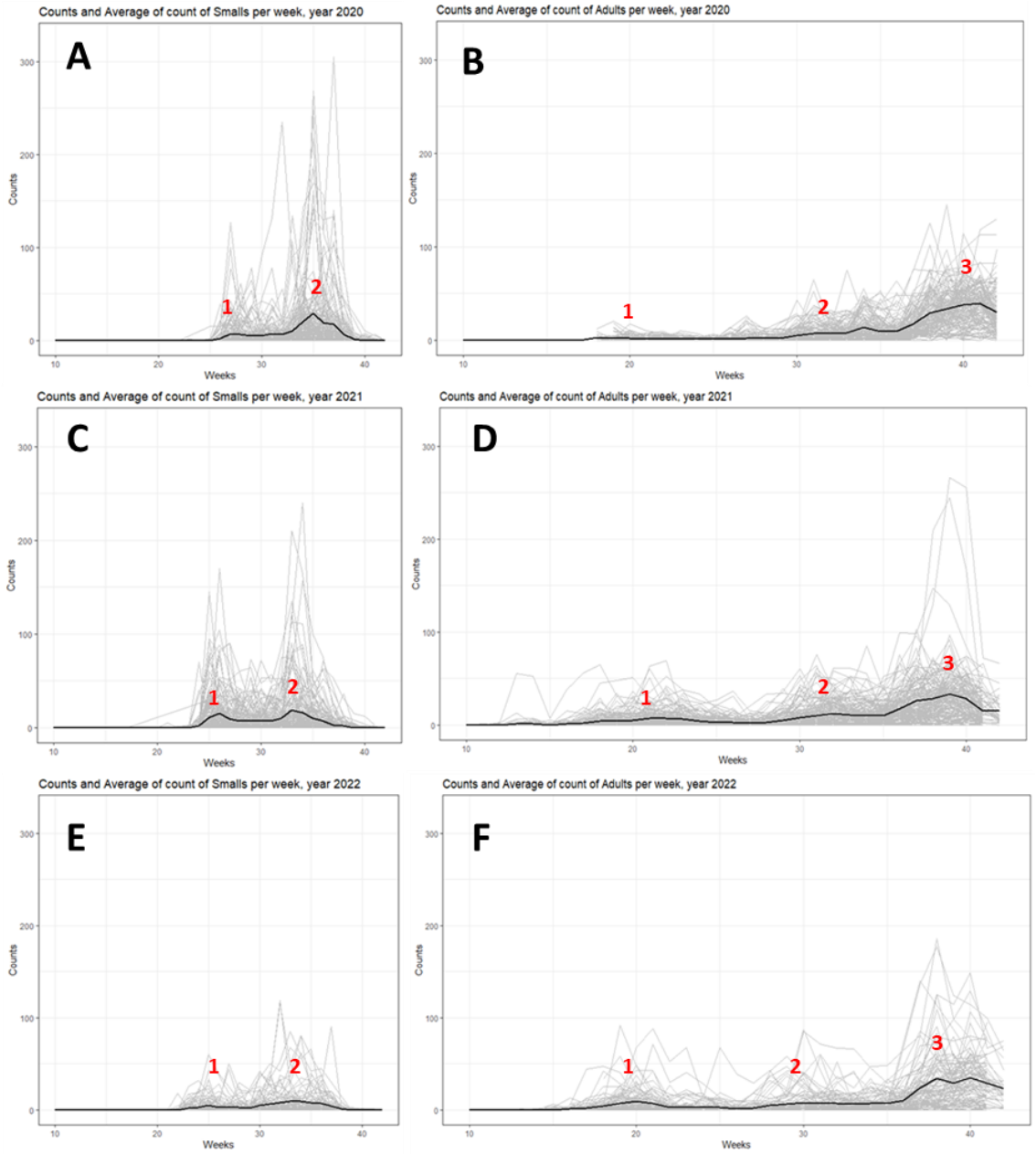


Figure 2. Counts from each trap and the corresponding averages are depicted in the figures, shown in grey and black respectively. Image A and image B represent the weekly counts of "Smalls" and "Adults" for the year 2020, respectively. Images C and D correspond to the weekly counts of "Smalls" and "Adults" for the year 2021, while Images E and F illustrate the weekly counts for 2022. The numbers in red indicate the population peaks. The x-axis represents time in weeks, while the y-axis denotes the counts.

Pearson's correlations between consecutive weeks were computed for BMSB "Smalls", "Larges", and "Adults" across the three years, indicating strong correlations. This reinforces the potential for constructing effective experimental variograms (Figure 3).

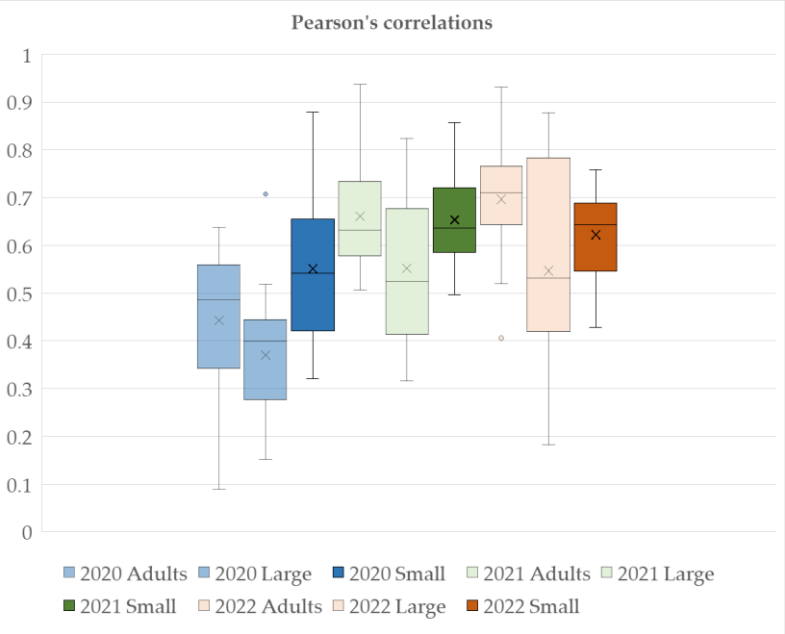


Figure 3. Pearson's correlation between consecutive weeks for the years of 2020, 2021 and 2022.

Despite temporal continuity, spatial variograms computed for "Smalls", "Larges", and "Adults" groups displayed significant spatial dispersion. Notably, the BMSB "Small" group exhibited superior spatial continuity, which led to its selection for constructing the spatiotemporal model.

The "Smalls" BMSB spatial model, generated using the DSS algorithm, offered insights into BMSB distribution over space and time for the years 2020-2022. For each year, 100 simulated images were generated and averaged. The resulting models, presented in Figure 4 for 2020, 2021 and 2022 respectively, depict counts above various thresholds in a 3D view, the third dimension represents time in weeks (WOTY).

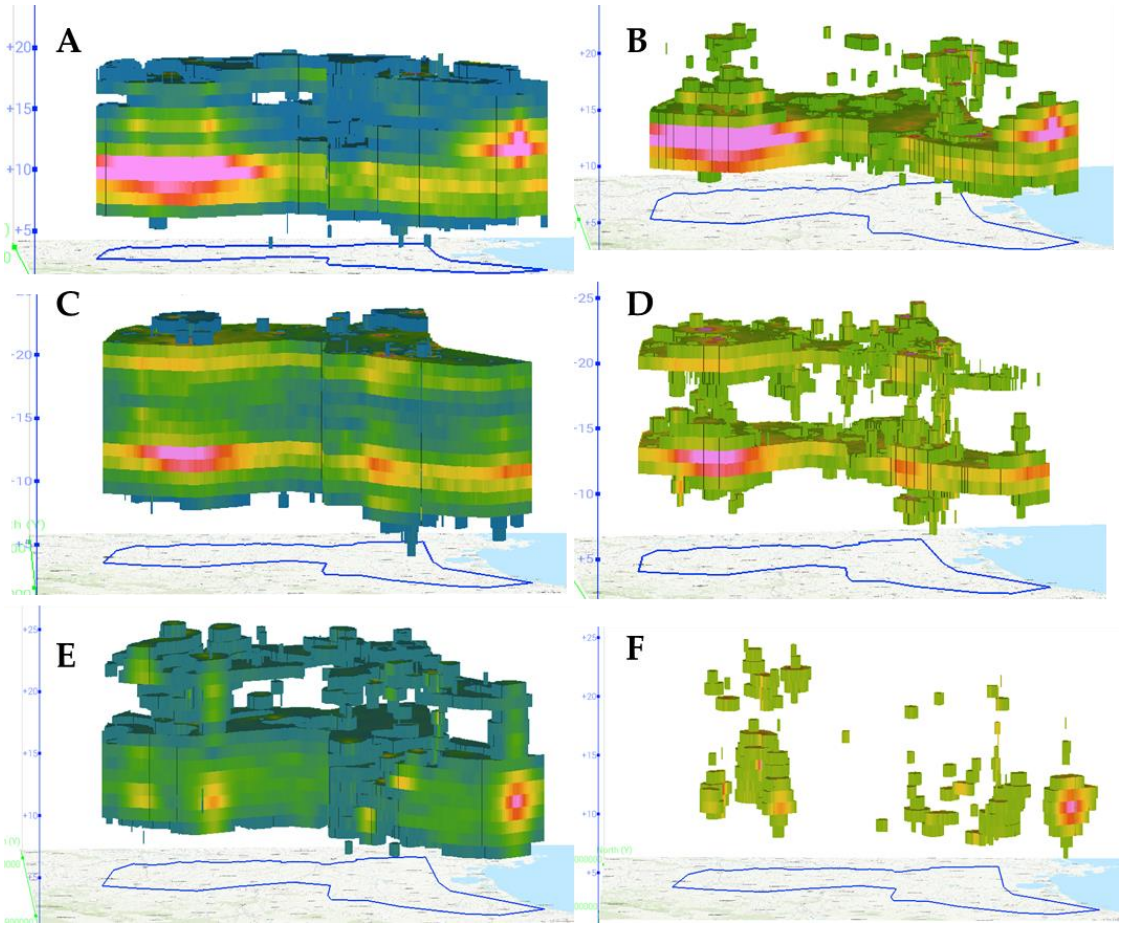


Figure 4. Composed image of the spatiotemporal model for the years of 2020 (A and B), 2021 (C and D) and 2022 (E and F) presented two filtering thresholds: A, C and E images filtered the number of counts by five (5); B, D and F filtered the number of counts by fifteen (15). The vertical axis (blue) represents time in weeks of the year. All images are depicted in a perspective view oriented from south to north. Pink is referent to greater number of counts and blue to lower number of counts.

Instead of viewing the model solely from a 3D perspective, this model was also depicted for time slices, enabling a more detailed spatial evaluation. Figure 5 presents counts for the 26, 32, and 38 WOTY across the years 2020, 2021, and 2022. For instance, in 2021 during Week 26, the count numbers are substantially higher, with the map displaying colours predominantly between green and pink, compared to 2020 and 2022. This suggests that the BMSB season in 2021 likely began earlier than in the other years. Similarly, in the 38th WOTY of 2020, BMSB counts are significantly higher than in the same WOTY for the years 2021 and 2022, indicating that the 2020 season likely ended later than the others.

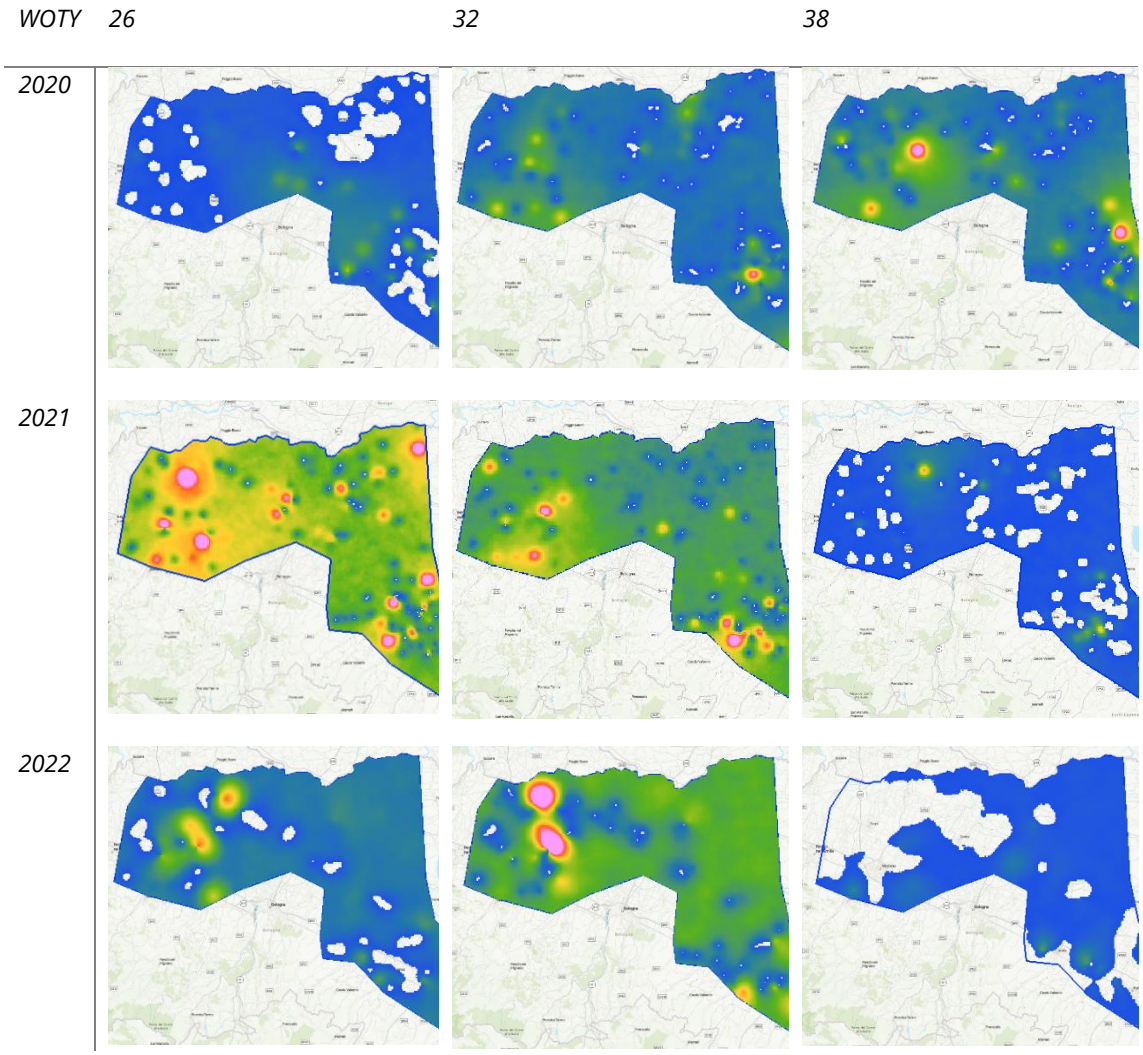


Figure *5*. Comparison between the 2020, 2021 and 2022 years for weeks 26, 32 and 38 of the years 2020, 2021 and 2022. Pink is referent to greater number of counts and blue to lower number of counts.

4. Discussion

In this study, we propose an article summarizing the development and application of a spatial-temporal simulation geostatistical model for managing BMSB populations. Traditional approaches in this field have relied on graphics [9], [10] and interpolation maps [11]–[13] to represent pest counts and distributions. However, our model offers a novel approach, utilizing data collected over three years (2020-2022) from 135 traps, with weekly measurements across 30 timepoints per year.

The model employs the DSS algorithm to generate equiprobable simulated images of BMSB counts, culminating in an average image. Although the algorithm is conventionally used in geosciences [14]–[16] and for climatic variables [17], [18], its application in this context has yielded satisfactory results. The value of the spatial-temporal model lies in its simplistic visualization of BMSB locations in the Emilia-

Romagna region. Additionally, this model can forecast areas of concern for the coming weeks and years.

Recommendations for intervention timing, including the deployment of egg parasitoids and chemical control, are informed by the model's predictions. By systematically exploring the spatial-temporal model on a weekly basis, stakeholders can identify areas and timepoints conducive to BMSB development, facilitating proactive monitoring and control measures.

Despite its predictive utility, the spatial-temporal model has limitations, including the omission of abiotic factors, overlooking biotic influences and seasonal variations. Addressing these limitations is crucial for improving the model's accuracy and applicability across diverse environmental conditions.

In summary, our spatial-temporal simulation geostatistical model offers a valuable tool for managing BMSB populations, providing insights into their distribution, development, and intervention strategies. Ongoing refinement and consideration of limitations are essential for maximizing its effectiveness in pest management efforts.

5. Conclusions

The BMSB has emerged as a worldwide pest with substantial economic impact in agriculture. In this study, we address the challenge of the development of a model that is useful for the management of this agricultural pest. Focusing on the Emilia-Romagna region of Italy, which has been severely affected by BMSB infestations, we compute a spatial-temporal model to map the abundance and distribution of younger instars of BMSB over time.

Future research endeavours should aim to replicate similar models for other regions and pests. From a technical perspective, leveraging geostatistical simulation algorithms like DSS and creating 3D representation models proved to be effective and offered enhanced data interpretation compared to traditional mapping methods.

Overall, our study highlights the importance of spatial-temporal modelling in pest management, providing a framework for informed decision-making and future advancements in agricultural pest control strategies.

Author Contributions: Luís Grilo - Conceptualization; Methodology, Writing - Original draft; Data acquisition and data curation; Investigation; **José Rafael Silva -** Conceptualization, Supervision, Writing-review and editing, Project administration; **Lara Maistrello -** Supervision, Investigation, Resources, Writing review and editing; **Elena Costi** - Investigation, Resources, Writing review and

editing; **Cristina M.Pinotti -** Supervision, Investigation, Writing-review and editing; **Manuela Simões -** Supervision, Writing – review and editing; **José Almeida -** Conceptualization, Methodology, Software, Data curation and Formal data analysis, Writing-review and editing, Funding acquisition All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgments: I acknowledge Cimice.net and for providing the Brown marmorated stink bug trap and capture data, also I want to thank Seequent company for providing academic licenses of Leapfrog Geo to NOVA-FCT.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Maistrello, L. et al. Tracking the spread of sneaking aliens by integrating crowdsourcing and spatial modeling: The Italian invasion of halyomorpha halys. Bioscience 68, 979–989 (2018). https://doi.org/10.1093/biosci/biy112
2. Fanfani, R. & Pieri, R. Il sistema agro-alimentare dell'Emilia-Romagna. Rapporto 2016. (Unione regionale delle Camere di commercio dell'Emilia-Romagna Regione Emilia-Romagna, Assessorato agricoltura, caccia e pesca, 2017).
3. CSO Italy Centro Servizi Ortofrutticoli. https://www.csoservizi.com/.
4. Sistema di Informazione Nazionale sull'Agricoltura Biologica. https://www.sinab.it/.
5. Maistrello, L. et al. Monitoring of the invasive Halyomorpha halys, a new key pest of fruit orchards in northern Italy. J. Pest Sci. (2004). 90, 1231–1244 (2017). https://dx.doi.org/10.1007/s10340-017-0896-2
6. Maistrello, L. (2024). Case Study 2: Halyomorpha halys (Stål) in Europe. In: Bueno, A.F., Panizzi, A.R. (eds) Stink Bugs (Hemiptera: Pentatomidae) Research and Management. Entomology in Focus, vol 9. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69742-5_15
7. Chiara Forresi, Enrico Gallinucci, Matteo Golfarelli, Lara Maistrello, Michele Preti, Giacomo Vaccari, A data platform for real-time monitoring and analysis of the brown marmorated stink bug in Northern Italy, Ecological Informatics, Volume 82, 2024, ISSN 1574-9541. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102713
8. Soares, A. Direct sequential simulation and cosimulation. Math. Geol. 33, 911–926 (2001). https://doi.org/10.1023/A:1012246006212
9. Goane, L. et al. Spatial and Temporal Variation in Chaetanaphothrips orchidii Moulton (Thysanoptera: Thripidae) Population and Its Damage on Lemon. Neotrop. Entomol. 42, 72–81 (2013). https://doi.org/10.1007/s13744-012-0081-5
10. Ntiri, E. S., Calatayud, P. A., Van Den Berg, J. & Le Ru, B. P. Spatio-temporal interactions between maize lepidopteran stemborer communities and possible implications from the recent invasion of spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) in Sub-Saharan Africa. Environ. Entomol. 48, 573–582 (2019). 10.1007/s13744-015-0358-6
11. Espinosa, M. et al. Temporal Dynamics and Spatial Patterns of Aedes aegypti Breeding Sites, in the Context of a Dengue Control Program in Tartagal (Salta Province, Argentina). PLoS Negl. Trop. Dis. 10, 1–21 (2016). https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004621
12. Grabarczyk, E. E. et al. Spatiotemporal Distribution of Two Euschistus spp. Stink Bugs (Hemiptera: Pentatomidae) in Southeastern Farmscapes. J. Insect Sci. 22, (2022). https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab111
13. Milonas, P. et al. Spatio-Temporal Distribution of Helicoverpa armigera (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) and Pectinophora gossypiella (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) in a Cotton Production Area. Neotrop. Entomol. 45, 240–251 (2016). 10.1007/s13744-015-0358-6
14. Barrela, E., Azevedo, L. & Demyanov, V. Geostatistical history matching - A zonation-based approach using direct sequential simulation. 79th EAGE Conf. Exhib. 2017 2017, 1–5 (2017). 10.3997/2214-4609.201700970
15. Caeiro, M. H., Demyanov, V. & Soares, A. Optimized History Matching with Direct Sequential Image Transforming for Non-Stationary Reservoirs. Math. Geosci. 47, 975–994 (2015).
16. Linsel, A., Sebastianwiesler, Haas, J., Bär, K. & Hinderer, M. Accounting for Local Geological Variability in Sequential Simulations—Concept and Application. ISPRS Int. J. Geo-Information 2020, Vol. 9, Page 409 9, 409 (2020). https://doi.org/10.3390/ijgi9060409
17. Costa, A. C. & Soares, A. Homogenization of climate data: Review and new perspectives using geostatistics. Math. Geosci. 41, 291–305 (2009). https://doi.org/10.1007/s11004-008-9203-3

18. Ribeiro, S., Caineta, J., Costa, A. C., Henriques, R. & Soares, A. Detection of inhomogeneities in precipitation time series in Portugal using direct sequential simulation. Atmos. Res. 171, 147–158 (2016). https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.014

Estimación del Rendimiento del Trigo a partir de Índices de Vegetación y Análisis Multivariado en Sistemas de Siembra Directa y Convencional

Diana Carolina Polanía-Montiel[1,2], Santiago Velásquez Rubio[3], Edna Jeraldy Suárez Cardozo[3], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[3] and Luis Manuel Navas Graciaa[1,*]

1 Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Grupo de investigación GIR-TADRUS, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 50, 34004 Palencia, España: luismanuel.navas@uva.es, dianacarolina.polania23@estudiantes.uva.es,

2 Programa de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Cra.5 No. 23-40, Neiva, Colombia: carolina.polania@usco.edu.co;

3 Departamento de Ciencia del Suelo, Universidad Federal de Lavras, P.O. Box 3037, 37203-202 Lavras, MG, Brasil; gabri-el.ferraz@ufla.br, santiago.rubio@estudante.ufla.br, edna.cardozo@estudante.ufla.br

Abstract: El trigo es un cereal clave en la alimentación y en diversas industrias, especialmente en Asia y Europa. En este estudio, se evaluaron modelos predictivos basados en índices de vegetación y técnicas de análisis multivariado para estimar el rendimiento del trigo (*Triticum aestivum* L.) en dos sistemas de establecimiento de cultivo: siembra directa (T1) y convencional (T2). La investigación se llevó a cabo en Palencia, España, utilizando un factorial simple como diseño experimental. Se recopilaron datos fisiológicos del cultivo y se adquirieron imágenes aéreas multiespectrales mediante un sistema aéreo no tripulado (UAS), a partir de las cuales se calcularon nueve índices de vegetación. El análisis de los datos se realizó mediante métodos multivariados, incluyendo Análisis de Componentes Principales (PCA) y Random Forest (RF), junto con pruebas estadísticas y curvas ROC para evaluar el desempeño de los modelos predictivos. Los resultados demostraron que el modelo RF fue eficaz en la diferenciación entre los tratamientos, alcanzando una precisión del 93.75% y un índice Kappa de 0.875, identificando el rendimiento como la variable más influyente. Entre los índices espectrales analizados, SAVI y AVI destacaron por su fuerte relación con la productividad durante la floración. En T2, estos índices mostraron correlaciones positivas (0.69), asociándose con un mayor rendimiento, mientras que en T1 la correlación fue negativa (-0.79), indicando una mayor productividad con valores más bajos de estos índices. Además, el modelo RF aplicado a la predicción del rendimiento presentó valores de R^2 superiores al 91% en los índices con mayor correlación, evidenciando su capacidad para estimar con precisión la producción del trigo en distintos sistemas de manejo. No obstante, T1 mostró una mayor capacidad explicativa en comparación con T2, lo que sugiere que el manejo no mecanizado influye significativamente en el desempeño del modelo predictivo.

Keywords: Siembra directa; siembra convencional; aprendizaje automático; clasificación supervisada, Random Forest, reducción de dimensionalidad

1. Introduction

La falta de acceso adecuado y estable a alimentos continúa representando un desafío crucial en las naciones en vías de desarrollo [1]. Aunque la globalización y la

expansión del comercio internacional de alimentos han avanzado considerablemente, garantizar el acceso a una cantidad suficiente de alimentos continúa siendo un reto significativo. Una de las estrategias más eficaces para reducir la inseguridad alimentaria consiste en incrementar la producción agrícola [2]. La mecanización agrícola es clave para enfrentar la escasez de mano de obra y fomentar una producción agrícola sostenible en los países en desarrollo. No obstante, son escasas las investigaciones que analizan en profundidad los mecanismos mediante los cuales la mecanización influye en los niveles de producción agrícola [3].

Así mismo, la mecanización es fundamental en la agricultura actual, ya que contribuye a mejorar tanto la eficiencia como la productividad. No obstante, los sistemas mecanizados más adecuados para el cultivo pueden diferir considerablemente en función del clima y otros factores específicos del entorno.

Los pequeños productores de zonas de secano suelen considerar que la labranza del suelo es esencial para obtener altos rendimientos en sus cultivos. No obstante, al aumentar la intensidad del cultivo y con ello la frecuencia e intensidad de la labranza pueden verse afectadas negativamente diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que termina limitando su productividad. Esta degradación se relaciona principalmente con la pérdida de materia orgánica, cuya descomposición se acelera con la labranza, especialmente en regiones cálidas, y se ve agravada por el escaso retorno de biomasa vegetal al suelo, debido a su uso en otros fines competitivos. En contraste, en la agricultura comercial a gran escala, este problema ha sido abordado con éxito mediante prácticas de agricultura de conservación, que incluyen sistemas con mínima alteración del suelo, mantenimiento de residuos vegetales y rotaciones o asociaciones de cultivos adecuadas, preferentemente con inclusión de leguminosas [4]. La agricultura de conservación representa una innovación en los métodos de producción agrícola, que combina técnicas como la mínima alteración del suelo, el uso de cobertura vegetal permanente y la rotación de cultivos. La adopción de nuevas tecnologías agrícolas por parte de los agricultores está estrechamente vinculada al tipo de información disponible para tomar decisiones informadas sobre su implementación [5].

El efecto de los sistemas de mecanización varía según el tipo de práctica de labranza empleada: convencional, reducida o cero, ya que cada una posee características particulares con beneficios y limitaciones propias. Aspectos como la calidad del suelo, la capacidad para conservar la humedad y el riesgo de erosión pueden cambiar considerablemente en función del método de labranza adoptado,

influyendo directamente en el rendimiento de los cultivos y en la eficiencia productiva del sistema agrícola [6].

Este estudio tiene como objetivo estimar el rendimiento del trigo en sistemas de establecimiento de cultivo: siembra directa y convencional a partir de índices de vegetación seleccionados mediante análisis estadísticos. Además, se evaluó la variable rendimiento y si esta tiene mayor capacidad discriminativa entre los sistemas de manejo, a través de un modelo de clasificación, desarrollando así una herramienta adecuada para la estimación de la productividad del cultivo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el Centros Integrados de Formación Profesional Viñalta que se encuentra situada en la provincia de Palencia. La zona está a 709 m.s.n.m y a 42° 0'16.35" latitud Norte y 4°34'8.70" longitud Oeste. El clima de la zona se clasifica como mediterráneo frío, caracterizado por una marcada continentalidad, precipitaciones escasas, inviernos prolongados y fríos, y veranos cortos de moderada intensidad térmica. Se observa un período seco bien definido durante los meses de julio y agosto, así como dos períodos húmedos: uno en primavera (abril a mediados de junio) y otro en otoño-invierno. Las precipitaciones en forma de nieve son poco frecuentes. La temperatura media anual es de 11.7 °C, con registros extremos de 38.4 °C como máxima y –14.8 °C como mínima. La humedad relativa promedio es del 71%, y la unidad paisajística corresponde a una vega. [7]. La Figura 1 ilustra la ubicación y la distribución de las parcelas en campo.

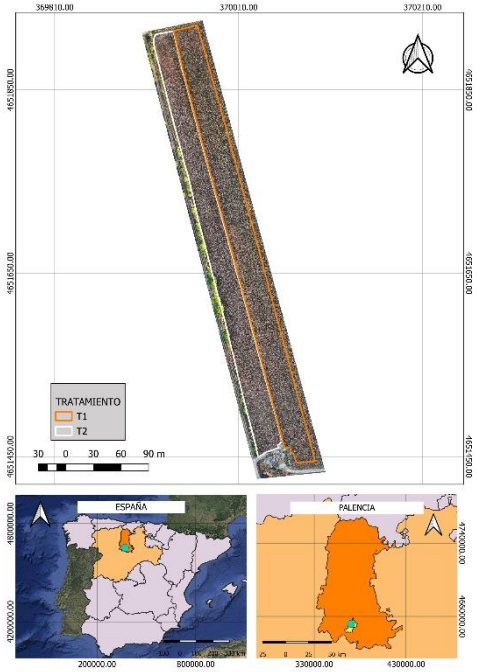


Figura 1. Zona de estudio y parcelas en T1 (siembra directa) y T2 (siembra convencional).

2.2. Diseño experimental

El estudio se estructuró bajo un diseño factorial simple, con dos unidades experimentales de aproximadamente 1.2 ha cada una, representando dos sistemas de manejo contrastantes. El tratamiento T1 correspondió a un sistema de siembra directa, donde se han mantenido prácticas de agricultura de conservación durante más de 30 años, orientadas a preservar la funcionalidad ecológica del suelo. En esta parcela, se excluyó completamente el uso de maquinaria agrícola, y el control de malezas se realizó mediante dos aplicaciones en presiembra de glifosato y un herbicida no selectivo. En el tratamiento T2, correspondiente al sistema de siembra convencional, se aplicaron labores mecánicas que incluyeron el uso de una grada de discos rápida (Minidisc), un cultivador y un vibrocultivador. Ambos tratamientos compartieron un cultivo antecesor de Veza, en condiciones de secano, y se sembró trigo de la variedad Andino con una densidad de siembra de 200 kg/ha.

2.3. Recolección de datos de campo

2.3.1. Respuestas fisiológicas y adquisición de imágenes aéreas

La selección de los puntos de muestreo se realizó mediante el software QGIS 3.34.15, generando una rejilla geoespacial con una resolución de 5 metros entre puntos. A partir de esta malla, se identificaron y seleccionaron 9 sitios de muestreo por parcela para cada tratamiento. La distribución de estos puntos fue optimizada utilizando el software RStudio 4.4.1, aplicando criterios de dispersión espacial que aseguran una cobertura representativa de las unidades experimentales (Figura 2).

En cada uno de los puntos seleccionados se instaló un aforador de 0.5 × 0.5 metros, dentro del cual se realizaron las recolecciones de datos correspondientes al estado fenológico de floración.

En cada punto de muestreo se recolectó información correspondiente al cultivo, contenida en la Tabla 1.

Figura 2. Puntos de muestreo en T1 (siembra directa) y T2 (siembra convencional).

Tabla 1. Variables medidas en cada punto de muestreo.

Variable	Método
Índice de clorofila Índice de flavonoles epidérmicos Índice de balance de nitrógeno (NBI) Chl/Flav Índice de antocianinas epidérmicas	Se utilizó el sensor Spad DUALEX® SCIENTIFIC [8]
Rendimiento (kg/ha)	Cosecha del cultivo en un área de 0.25 m^2
Nitrógeno y Proteínas (%)	Método de Kjeldahl

Las imágenes fueron capturadas usando una UAS DJI Mavic 3 Enterprise, modelo M3M, clasificado como equipo de rotor con cuatro hélices, tiene integrado un cámara RGB CMOS 4/3 y cámara multiespectral CMOS ½.8". El sensor multiespectral permite recopilar datos en cuatro bandas espectrales verde (G 560 ± 16 nm), roja (R 650 ± 16 nm), borde rojo (RE 730 ± 16 nm) e infrarrojo cercano (NIR 860 ± 26 nm).

El levantamiento aéreo se llevó a cabo el mismo día en que se realizaron las mediciones fenológicas en campo, en un intervalo comprendido entre las 10:00 a. m. y la 1:00 p. m. La misión fue ejecutada a una altitud de 50 metros y a una velocidad promedio de 4.4 m/s. Las imágenes obtenidas presentaron una resolución espacial (GSD) de 2.31 cm por píxel, con un 80 % de superposición tanto frontal como lateral, lo que aseguró una cobertura continua y uniforme. La planificación y ejecución del trayecto de vuelo se realizaron de manera automatizada mediante el software DJI Pilot 2, integrado al sistema de control del UAS.

Con el fin de garantizar la calidad radiométrica de los datos adquiridos, se realizó una calibración del sensor antes y después de cada vuelo, utilizando una placa de referencia reflectante. Este procedimiento permitió corregir las variaciones de la luz solar incidente y obtener información espectral precisa y comparable. Asimismo, para asegurar una georreferenciación de alta precisión, el UAS empleado incorporó un sistema de posicionamiento Real-Time Kinematic (RTK), el cual proporciona exactitud centimétrica mediante conexión con la red geodésica nacional de estaciones de referencia GNSS (ERGNSS). En el caso de la zona de estudio, se utilizó la estación PALE3M, perteneciente a la red GNSS de Castilla y León, lo que permitió una geolocalización fiable de cada imagen adquirida durante la misión.

2.4. Análisis estadístico

Para identificar las variables más influyentes en la diferenciación de tratamientos, se integraron técnicas de reducción de dimensionalidad y modelado predictivo, facilitando el análisis de datos complejos con interpretabilidad y precisión. Se procesaron las variables fisiológicas del cultivo y los índices de vegetación, aplicando análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad y destacar los factores clave. Previamente, los datos numéricos fueron normalizados (media = 0; desviación estándar = 1) para asegurar su comparabilidad y equidad en el análisis.

Se seleccionaron los componentes principales que explicaban al menos el 90% de la varianza, y los datos transformados se dividieron en entrenamiento (70%) y prueba (30%). El modelo RF fue optimizado mediante validación cruzada y ajuste del hiperparámetro mtry. Su desempeño se evaluó con matriz de confusión y métricas como precisión y sensibilidad. La curva ROC y el AUC confirmaron su capacidad para diferenciar entre los tratamientos de T1 y T2.

Para evaluar diferencias significativas entre tratamientos, se aplicaron pruebas de medias sobre los índices de vegetación. Previamente, se verificó la normalidad de los datos mediante inspección gráfica y la prueba de Anderson-Darling [9]. En los

casos con distribución normal se utilizó ANOVA ($p < 0.05$), y para datos no normales se aplicó la prueba de Levene basada en medias [10].

Los índices que mostraron diferencias significativas fueron analizados con la correlación de Spearman y la curva ROC, identificando aquellos con mayor capacidad discriminativa. Los índices más correlacionados con el rendimiento se utilizaron para entrenar un modelo de predicción mediante RF, utilizando el 70% de los datos para entrenamiento y el 30% para validación (Sharma et al., 2025). La precisión del modelo se evaluó con el coeficiente de determinación (R^2). Todo el análisis se realizó en RStudio (versión 2024.04.2+764 "Chocolate Cosmos").

3. Resultados

3.1. Análisis de Componentes Principales y Random Forest

La aplicación del PCA permitió reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, identificando combinaciones lineales que explican la mayor parte de la varianza. La Figura 3 muestra que los dos primeros componentes concentran aproximadamente el 76% de la varianza acumulada. Según la Figura 4, las dimensiones 1 y 2 son las que más aportan a la explicación de la variabilidad entre las variables analizadas.

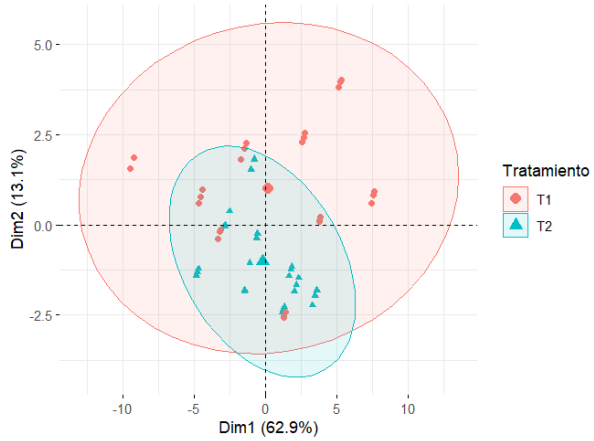


Figura 3. Porcentaje de varianza explicada por cada componente principal.

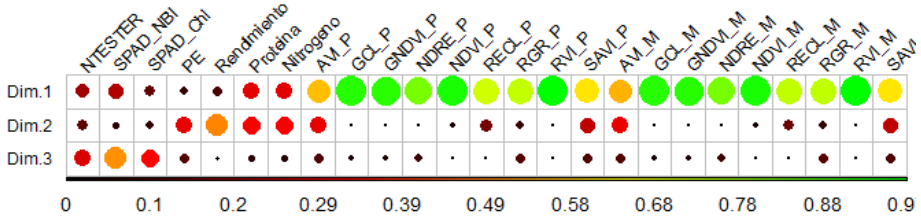


Figura 4. Mapa de la calidad de representación de las variables en el análisis de componentes principales aplicado a las respuestas fisiológicas del cultivo y a los índices de vegetación.

Se construyó un conjunto de datos reducido mediante selección de componentes principales, reteniendo aquellos necesarios para explicar al menos el 90% de la varianza acumulada. La partición del conjunto se realizó en 70% para entrenamiento y 30% para validación. Se utilizó validación cruzada de 5 pliegues y se exploraron tres valores del hiperparámetro mtry (2, 3 y 6). El modelo RF alcanzó un desempeño óptimo, con una precisión del 94,29% y un coeficiente Kappa de 0,8831, evidenciando una direfenciación altamente consistente. Notablemente, solo dos predictores por división fueron suficientes para obtener este rendimiento.

La matriz de confusión mostró que el modelo distingue eficazmente entre las clases T1 y T2, con una precisión global del 93.75% y un intervalo de confianza del 95% (69.77%–99.84%). El índice Kappa de 0.875 confirma un alto grado de concordancia entre las predicciones y los valores reales, superando lo esperado por azar.

Este resultado se refuerza con el análisis de la curva ROC, que evidencia un excelente desempeño del modelo en la diferenciación de los tratamientos, con un AUC de 0.9375, lo que indica una precisión promedio del 93.75% en la clasificación de las clases. Tras confirmar la adecuada diferenciación entre tratamientos, se analizó la relevancia de las variables en el modelo RF. La Dim. 2 destacó como la más influyente, con un valor de importancia cercano a 10 (Figura 5), lo que resalta su aporte clave en la precisión de las predicciones. Dentro de esta dimensión, las variables rendimiento fue identificada como las de mayor contribución, lo que sugiere que debe recibir atención prioritaria debido a su impacto significativo en los resultados del análisis.

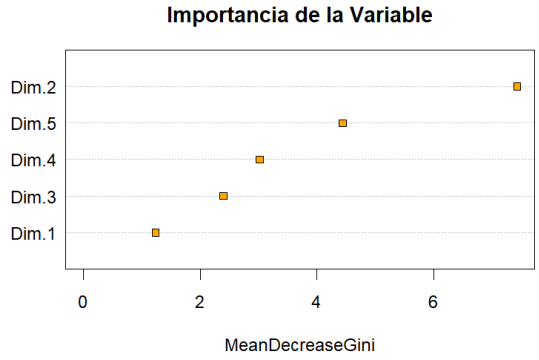


Figura 5. Importancia de las variables de Random Forest representada en dimensiones

3.2. Análisis índice de vegetación

De los nueve índices evaluados, ocho mostraron diferencias significativas en las pruebas de medias, tanto al considerar promedios como medianas. La correlación de Spearman permitió identificar los índices más relevantes, destacándose AVI y SAVI por su alta capacidad de discriminación entre las clases T1 y T2, a pesar de sus

bajos o negativos valores de R^2, lo que indica una relación más estrecha con la variable objetivo.

La curva ROC confirmó los hallazgos de la correlación de Spearman, destacando al índice AVI como el más predictivo (AUC = 0.8025), seguido por SAVI (AUC = 0.7778). Ambos índices mostraron la mayor capacidad discriminativa del modelo, siendo los más eficaces para diferenciar los tratamientos.

Se aplicó nuevamente la correlación de Spearman utilizando los índices de vegetación con mejor capacidad discriminativa, con el fin de evaluar su relación con la variable de mayor relevancia según el modelo RF (rendimiento) (Figura 6). Los índices AVI_T2 y SAVI_T2 mostraron correlaciones positivas significativas con el rendimiento en el tratamiento T2 (r = 0.69), indicando que valores más altos de estos índices se asocian con mayores rendimientos. En contraste, AVI_T1 y SAVI_T1 presentaron correlaciones negativas marcadas en el tratamiento T1 (r = -0.79), lo que sugiere que menores valores de estos índices se vinculan con un mayor rendimiento en ese sistema de manejo.

Figura 6. Correlación de Spearman entre el rendimiento y los índices de vegetación con mayores diferencias significativas de los tratamientos T1 (siembra directa) y T2 (siembra convencional) en floración.

3.3. Predicción del Rendimiento

La estimación del rendimiento del trigo se realizó a partir de los índices espectrales AVI y SAVI, seleccionados por su sensibilidad a las diferencias entre sistemas de manejo. Se aplicó el algoritmo RF, entrenado con el 70% de los datos y validado con el 30% restante. La predicción se centró en cinco puntos representativos, reflejando la eficacia del modelo en ambos tratamientos (T1 y T2). Adicionalmente, se generaron gráficos de regresión lineal para visualizar la relación entre el rendimiento real y el estimado, y se calculó el coeficiente de determinación (R^2) como métrica principal para evaluar la precisión del modelo.

La evaluación del modelo predictivo mostró una alta precisión en la estimación del rendimiento del trigo para ambos tratamientos, con coeficientes de determinación (R^2) superiores al 91% en todas las pruebas. En las Figuras 7 y 8 se observa una fuerte concordancia entre los valores reales y previstos, destacando un desempeño ligeramente superior en el tratamiento T1. Estos resultados validan la efectividad del enfoque basado en índices de vegetación y aprendizaje automático para predecir de forma precisa y no destructiva el rendimiento del cultivo en distintos sistemas de manejo.

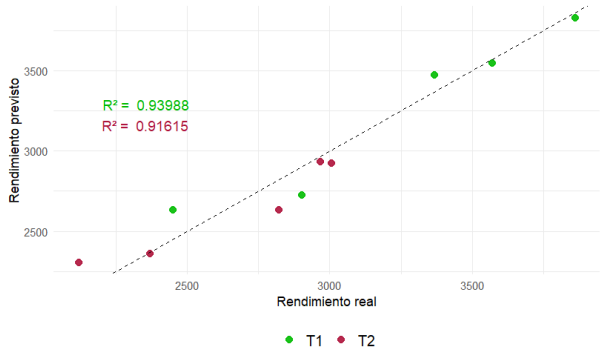


Figura 7. Rendimiento Real vs Predicho con el índice espectral AVI en los tratamientos T1 (siembra directa) y T2 (siembra convencional) en floración.

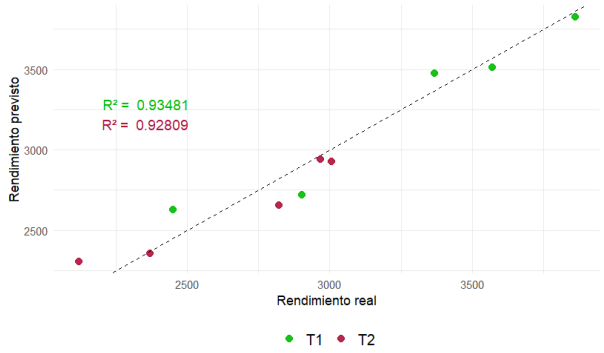


Figura 8. Rendimiento Real vs Predicho con el índice espectral SAVI en los tratamientos T1 (siembra directa) y T2 (siembra convencional) en floración.

4. Discusión

El uso combinado de PCA y RF demostró ser una herramienta eficaz para modelar el rendimiento del trigo, permitiendo discriminar entre T1 y T2 a partir de variables fisiológicas e índices de vegetación. El PCA explicó el 76% de la varianza con sus dos primeras componentes, lo cual es consistente con lo reportado por Liu et al. [12], quienes evidenciaron su efectividad para identificar patrones discriminantes en sistemas de manejo complejos. Esta técnica permitió simplificar los datos sin pérdida significativa de información, facilitando la interpretación y selección de variables relevantes.

La evaluación del modelo mediante la matriz de confusión arrojó una precisión del 93.75% y un índice Kappa de 0.875, indicando una alta concordancia. Estos resultados respaldan lo encontrado por Zhao et al. [13], quienes destacaron la efectividad de RF en la predicción del rendimiento del trigo en la llanura del norte de China. Sin embargo, a diferencia de dicho estudio, enfocado en biomasa e índices climáticos, esta investigación se centra en variables fisiológicas e índices de vegetación aplicados a sistemas contrastantes, incluyendo una parcela con tres décadas de siembra directa.

El modelo RF identificó al rendimiento como la variable más influyente para diferenciar los tratamientos, en concordancia con hallazgos previos. Esaulko et al. [14] señalaron que la siembra directa puede estabilizar la productividad en regiones áridas al mejorar la infiltración y reducir la evaporación, mientras que Colecchia et al. [15] reportaron mayores rendimientos en sistemas convencionales bajo condiciones hídricas favorables. Estos resultados respaldan el valor de los índices espectrales para modelar el rendimiento y evidencian las ventajas de la agricultura de conservación a largo plazo, aunque su eficacia depende del contexto edafoclimático y del manejo aplicado.

Durante la fase de floración, los índices de vegetación evidenciaron diferencias significativas entre los sistemas de manejo, hallazgo que también fue señalado por Walsh et al. [16], quienes destacaron la capacidad de los UAS e índices de vegetación para detectar variaciones fenológicas con precisión. El análisis mediante curva ROC y correlaciones de Spearman identificó a AVI y SAVI como los índices más efectivos para discriminar entre tratamientos, con valores de AUC de 0.8025 y 0.7778, respectivamente. En T2, ambos índices mostraron correlaciones positivas con el rendimiento ($r = 0.69$), mientras que en T1, la relación fue inversa ($r = -0.79$), indicando que valores más bajos se asocian a mayor productividad. Este comportamiento coincide con Cheng et al. [17], quienes resaltaron la utilidad del SAVI en contextos de bajo disturbio del suelo, como en la simbra directa.

En la estimación del rendimiento, los índices SAVI y AVI demostraron ser efectivos no solo para diferenciar entre tratamientos, sino también como predictores precisos en ambos sistemas de laboreo. Aplicando RF, se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.90, evidenciando un alto nivel de ajuste. En particular, AVI destacó como un indicador clave al reflejar condiciones del dosel vegetal y eficiencia fotosintética, aspectos directamente relacionados con el desarrollo del cultivo. Estos hallazgos coinciden con Yang et al. [18], quienes resaltan la capacidad de los índices de vegetación para detectar variaciones en el rendimiento mediante el monitoreo no destructivo de parámetros fisiológicos. Así, AVI no solo discrimina entre T1 y T2, sino que también permite estimar el

rendimiento bajo distintas estrategias de manejo, consolidando el valor de los índices espectrales en la agricultura de precisión.

5. conclusión

La reducción de dimensionalidad mediante PCA permitió identificar de forma eficiente las variables más relevantes del conjunto de datos, facilitando la interpretación y revelando que los dos primeros componentes principales explican el 76% de la varianza total, lo cual refuerza su utilidad en estudios agronómicos multivariados.

Los índices espectrales AVI y SAVI demostraron ser los más efectivos para discriminar entre los sistemas de siembra directa (T1) y convencional (T2), destacando no solo por su capacidad clasificatoria (AUC > 0.77), sino también por su alto poder predictivo en la estimación del rendimiento ($R^2 > 0.91$), especialmente en condiciones de manejo no mecanizado.

La integración de técnicas de teledetección con algoritmos de aprendizaje automático como RF se consolida como una herramienta robusta en agricultura de precisión, al permitir la identificación de indicadores clave (rendimiento) y facilitar el diseño de estrategias de manejo adaptadas a condiciones locales, lo que favorece la sostenibilidad y eficiencia productiva del cultivo de trigo.

Contribuciones de los autores: “Conceptualización, D.C.P.-M., S.V.-R. y E.J.S.-C.; metodología, D.C.P.-M., S.V.-R., E.J.S.-C. y L.M.N.-G.; software, D.C.P.-M., S.V.-R. y E.J.S.-C; validación, D.C.P.-M., S.V.-R., E.J.S.-C., G.A.S.-F. y L.M.N.-G.; análisis formal, D.C.P.-M., S.V.-R., E.J.S.-C., G.A.S.-F. y L.M.N.-G.; investigación, D.C.P.-M., S.V.-R. y E.J.S.-C.; recursos, L.M.N.-G.; curación de datos, D.C.P.-M., S.V.-R. y E.J.S.-C.; redacción: preparación del borrador original, D.C.P.-M., S.V.-R. y E.J.S.-C.; redacción: revisión y edición, D.C.P.-M., G.A.S.-F. y L.M.N.-G.; visualización, D.C.P.-M., G.A.S.-F. y L.M.N.-G.; supervisión, G.A.S.-F. y L.M.N.-G.; administración del proyecto, L.M.N.-G.; obtención de financiación, L.M.N.-G.

Referencia

1. Kinda, S. R., Kere, N. E., Yogo, T. U., & Simpasa, M. A. (2022). Do land rushes really improve food security in Sub-Saharan Africa? Food Policy, 113. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2022.102285
2. Luan, Y., Zhu, W., Cui, X., Fischer, G., Dawson, T. P., Shi, P., & Zhang, Z. (2019). Cropland yield divergence over Africa and its implication for mitigating food insecurity. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *24*(5), 707–734. https://doi.org/10.1007/s11027-018-9827-7
3. Wang, T., Liu, H., & Wang, Z. (2025). Decomposing the Impact of Agricultural Mechanization on Agricultural Output Growth: A Case Study Based on China’s Winter Wheat. Sustainability (Switzerland), 17(5). https://doi.org/10.3390/su17051777
4. Johansen, C., Haque, M. E., Bell, R. W., Thierfelder, C., & Esdaile, R. J. (2012). Conservation agriculture for small holder rainfed farming: Opportunities and constraints of new mechanized seeding systems. Field Crops Research, 132, 18–32. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.026

5. Valerio Robles, M., Rendón Medel, R., Ulises Toledo, J., & Díaz José, J. (2016). Adoption of conservation agriculture practices in Tlaxcala, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 15, 3103–3113. https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/issue/view/17
6. Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. Nature Climate Change, 11(4), 306–312. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1
7. Ayuntamiento de Palencia. (2008). *Plan General de Ordenación Urbana de Palencia. Informe Ambiental.* 1–121. https://www.aytopalencia.es/area/urbanismo-e-infraestructura/pgou-y-modificaciones
8. METOS® by Pessl Instruments. (n.d.). Dualex Fomento de la sanidad vegetal y Seguimiento de la nutrición. Retrieved December 16, 2024, from https://metos.global/es/dualex/
9. Scholz, F. W., & Stephens, M. A. (1987). K-sample Anderson–Darling tests. Journal of the American Statistical Association, 82(399), 918–924. https://doi.org/10.1080/01621459.1987.10478517
10. Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. Revista Colombiana de Estadística, 57–76.
11. Sharma, M., Goel, S., & Elias, A. A. (2025). Predictive modeling of soil profiles for precision agriculture: a case study in safflower cultivation environments. *Scientific Reports*, *15*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-83551-9
12. Liu, T., Yang, T., Zhu, S., Mou, N., Zhang, W., Wu, W., Zhao, Y., Yao, Z., Sun, J., Chen, C., Sun, C., & Zhang, Z. (2024). Estimation of wheat biomass based on phenological identification and spectral response. *Computers and Electronics in Agriculture*, *222*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109076
13. Zhao, Y., Xiao, D., Bai, H., Tang, J., Liu, D. L., Qi, Y., & Shen, Y. (2023). The Prediction of Wheat Yield in the North China Plain by Coupling Crop Model with Machine Learning Algorithms. Agriculture (Switzerland), 13(1). https://doi.org/10.3390/agriculture13010099
14. Esaulko, A., Sitnikov, V., Pismennaya, E., Vlasova, O., Golosnoi, E., Ozheredova, A., Ivolga, A., & Erokhin, V. (2023). Productivity of Winter Wheat Cultivated by Direct Seeding: Measuring the Effect of Hydrothermal Coefficient in the Arid Zone of Central Fore-Caucasus. Agriculture (Switzerland), 13(1). https://doi.org/10.3390/agriculture13010055
15. Colecchia, S. A., De Vita, P., & Rinaldi, M. (2015). Effects of tillage systems in durum wheat under rainfed mediterranean conditions. Cereal Research Communications, 43(4), 704–716. https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.015
16. Walsh, O. S., Marshall, J. M., Nambi, E., Jackson, C. A., Ansah, E. O., Lamichhane, R., McClintick-Chess, J., & Bautista, F. (2023). Wheat Yield and Protein Estimation with Handheld and Unmanned Aerial Vehicle-Mounted Sensors. Agronomy, 13(1). https://doi.org/10.3390/agronomy13010207
17. Cheng, Z., Gu, X., Zhou, Z., Yin, R., Zheng, X., Li, W., Cai, W., Chang, T., & Du, Y. (2024). Crop aboveground biomass monitoring model based on UAV spectral index reconstruction and Bayesian model averaging: A case study of film-mulched wheat and maize. *Computers and Electronics in Agriculture*, *224*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109190
18. Yang, Z., Tian, J., Zhang, L., Zan, O., Yan, X., & Feng, K. (2024). Spectral detection of leaf carbon and nitrogen as a proxy for remote assessment of photosynthetic capacity for wheat and maize under nitrogen stress. Computers and Electronics in Agriculture, 224. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109174

Diseño, análisis, diseño y cálculo de la instalación de un alumbrado inteligente en sistemas agrovoltaicos en un cultivo de patata.

Antonio Rodríguez Nicolás[1], Francisco J. Cánovas Rodríguez[2], Dolores Parras-Burgos[3] y José Miguel Molina-Martínez[1].

1 Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia. antonio.rodriguez@edu.upct.es, josem.molina@upct.es

2 Dpto de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. fcojavier.canovas@upct.es

3 Dpto de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. dolores.parras@upct.es

Resumen: La creciente necesidad de optimizar los recursos energéticos en el sureste de España ha impulsado el desarrollo de sistemas "agrovoltaicos", que integran la producción agrícola con la generación de energía eléctrica. Nuestro innovador modelo presenta una estructura elevada de 4,2 metros, que permite instalar paneles fotovoltaicos móviles sobre los cultivos sin interferir en las labores agrícolas. Estos paneles se ajustan regulando la cantidad de luz natural recibida, complementándose con un sistema de iluminación LED cuando sea necesario. Las luminarias, en forma de campana, han sido seleccionadas para proporcionar la intensidad lumínica óptima para los cultivos de la patata en cada etapa de su desarrollo, adaptándose a las demandas de luz de cada fase fenológica. Se utiliza el software DIALux Evo 13 para la planificación y cálculo de la distribución lumínica, finalmente se ha dimensionado el sistema con lámparas de 50W y 6000 lúmenes. Estas luminarias pueden encenderse y apagarse de manera alternada, sincronizadas con el ajuste de las placas solares, para asegurar que se cubran las necesidades lumínicas máximas de la patata que están en torno a 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. De este modo, se garantiza que los cultivos reciban siempre la cantidad adecuada de luz, complementándose esta luz aportada con la ya proporcionada de manera natural por el sol

Palabras clave: fotovoltaica, iluminación led, control de iluminación, placas móviles, patatas.

1. Introducción

La creciente demanda de energía y agua en los cultivos hortícolas del sur de Europa, especialmente en España, ha impulsado la integración de la energía fotovoltaica en la agricultura. Esta solución permite aprovechar el alto número de horas de sol en la región para optimizar la producción agrícola y la generación de energía [1]. Sin embargo, su implementación en entornos abiertos plantea desafíos técnicos y estratégicos que requieren un estudio detallado.

En este trabajo se presenta el diseño y cálculo de un sistema de alumbrado adaptado a una estructura agrovoltaica cuyas cerchas se encontrarán a 4,2 metros

de altura, esta altura permitirá teniendo en cuenta a la luminaria el paso de maquinaria agrícola sin interferencias. La instalación consta de una cubierta a dos aguas con 36 módulos fotovoltaicos en cada lado, de los cuales la mitad son móviles. Estos módulos pueden desplazarse en grupos de tres, regulando la cantidad de luz natural que recibe el cultivo según sus necesidades fenológicas. En la Figura 1, se muestra la estructura abierta totalmente en una de sus aguas (1.a) y representación inferior de la estructura (1.b).

El objetivo principal es la de diseñar una instalación de alumbrado artificial basado en iluminación LED que, en función del aporte de luz natural existente, y de las necesidades que pueda requerir nuestro cultivo, posibilite que el aporte de esta instalación de alumbrado en nuestro cultivo, sea tal, que suplemente al existente por la luz natural, de forma que nuestro cultivo reciba el aporte "ideal" de luz, atendiendo a los parámetros de cantidad de luz y espectro de luz que se emita sobre nuestro cultivo [2,3]. Para la consecución de este objetivo principal, se debe tener en cuenta de que se parte de un sistema cuyo fin primordial es gestionar el movimiento de los paneles para maximizar tanto la producción de energía como la calidad del cultivo. En dicho sistema se prevé tres niveles de apertura de los módulos, lo que genera variaciones en la luz disponible en determinadas zonas del cultivo. Es fundamental considerar, que está variación no viene dado sólo por la apertura artificial que se está generando en el techo de nuestra estructura, sino también por la inclinación o incidencia de los rayos solares sobre nuestra estructura, muy dependiente del momento del año, así como de la hora en cada día, todo esto sin tener en cuenta situaciones puntuales como por ejemplo los días nublados

(a) (b)

Figura 1. a) Disposición totalmente abierta de los módulos, en una cara, y b) vista inferior de dicha configuración.

En el presente caso a estudio se pretende garantizar un crecimiento óptimo del cultivo con un sistema de iluminación con luminarias LED estratégicamente distribuidas, las luminarias utilizadas de referencia en nuestros estudios se caracterizarán por ser de fácil acceso y de uso no específico para un entorno agrícola, a partir de esta elección, se consigue que la solución obtenida sea especialmente más económica –costo de la luminaria será mucho más bajo-, y

también se conseguirá que las posibles acciones de mantenimiento, como podría ser la sustitución de una lámpara / luminaria sean más fáciles de llevar a cabo en un futuro, ésta consideración ha dificultado la consecución de los niveles de iluminación y de espectros ideales para nuestro cultivo, pero por el contrario, se ha conseguido una instalación de alumbrado que favorecerá un crecimiento óptimo de nuestro cultivo, con un menor costo por luminaria, y una energía generada por nuestras placas susceptible de ser utilizado para otros fines, e incluso su venta a la red. Todo esto se justifica por el hecho de que las lámparas específicas para uso en invernaderos y estructuras cerradas se caracterizan por un precio y consumo muy alto.

En nuestro caso dichas luminarias serán controladas mediante microcontroladores que ajustarán las luminarias que deben estar conectadas en función de la fase fenológica de la planta y del aporte de luz natural existente.

En esta comunicación se presenta el sistema de iluminación diseñada, junto con el análisis de consumos energéticos, eficiencia lumínica y espectros de las luminarias para optimizar el rendimiento de las plantas a lo largo del día y en cada fase fenológica [4], con el menor consumo energético.

Es decir, asegurando la viabilidad económica de la instalación, haciendo que la propuesta sea rentable y sostenible a largo plazo en el sector hortícola en general, y en particular, en el cultivo de la patata. Ya que, como parte la iluminación artificial de una solución integral se busca que no sólo se cubran las necesidades de autoconsumo energético –desviando el porcentaje más bajo posible al alumbrado-, sino que se buscará la existencia de un excedente de electricidad que podrá ser comercializado, unificando la producción agrícola y energética en este innovador modelo “agrovoltaico”.

2. Materiales y Métodos

2.1. Punto de partida.

En primer lugar, se definirá o diseñará una estructura, donde se instale nuestra instalación fotovoltaica “movible”, y la iluminación, y por supuesto, el cultivo de referencia aspecto fundamental para definir la intensidad lumínica y espectro necesario en cada momento. La parcela de referencia es de 13,5 × 12,8 m, cultivada con patatas, sobre la que se levanta nuestro sistema fotovoltaico, teniendo este una altura, desde la superficie del suelo, de 4,2 m. La zona de estudio de nuestra parcela de referencia será la formada por la superficie central de dicha estructura, con esta consideración lo que se consigue es minimizar los efectos bordes –frontera-, es decir, minimizar los efectos medio ambientales especialmente existentes en la zona cercana a los laterales de nuestra estructura, consiguiendo con esto que los

resultados del estudio sean extrapolables a la de una estructura agrovoltaica de mucha mayor superficie.

2.2. Software utilizado.

Entre los parámetros fundamentales necesarios para validar nuestra instalación de alumbrado, está el nivel de iluminación y la distribución de dicha iluminación sobre la superficie de referencia, para conseguir estos valores, en el mercado actualmente hay dos softwares susceptibles de utilizarse, el DialuxEVO y Relux. Tomando como referencia que la mayoría de los fabricantes de lámparas y luminarias tienen definidos los pluggins de sus luminarias para el DialuxEVO, versión 13 especialmente, se elige el mismo, para el modelado y simulación de nuestra instalación de alumbrado.

Este software nos permite la representación de la estructura tridimensional diseñada previamente, para así estudiar y simular el comportamiento de nuestra instalación de alumbrado con las soluciones localizadas en el mercado, en cuanto a lámparas –luminarias-, con sus potencias (W), y flujos lumínicos (lux) necesarios para cada cultivo, en nuestro caso la patata.

2.3. Dimensionado.

Una vez determinado el entorno –estructura-, el cultivo de referencia y el software de referencia, se debe definir/dimensionar todos los parámetros o necesidades lumínicas del cultivo propuesto, siendo esta la patata (Solanum tuberosum). Revisando bibliografía se determinará que la luz máxima demandada por algunas variedades de patata puede ascender hasta 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [5], en nuestro caso, no se conoce la demanda máxima de nuestra variedad, por lo que se tomará como referencia de diseño el valor de 700 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Teniendo en cuenta que el programa tomado como referencia DialuxEVO, nos da los niveles de iluminación en lux, y que los parámetros que definen las necesidades lumínicas de nuestro cultivo viene dado en $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, se hace necesario algún procedimiento que nos permita interpretar los modelos y valores obtenidos por DialuxEVO, para ello se utilizará el procedimiento de Sipos [8], el cual permite estimar el factor de conversión de lux a partir de $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$., o lo que es lo mismo, poder valorar si realmente nuestra fuente lumínica está aportando la cantidad de luz necesaria.

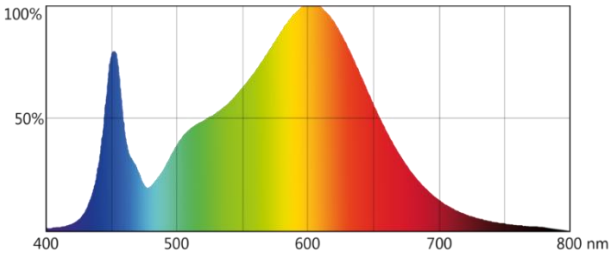


Figura 2. Espectro de emisión para lámparas LED con temperatura de color de 3000K [6]

Antes de aplicar el procedimiento [8], se debe conocer que el flujo de fotones fotosintéticamente activos (PPFD) se define como la cantidad de fotones en el rango de 400 a 700 nm que impactan en una superficie por unidad de tiempo y área ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), como se observa en la Figura 2. Matemáticamente, el PPFD se calcula como una integral en el dominio del espectro [7].

$$PPFD = \int_{400}^{700} \mathrm{SPD}(\lambda) \cdot AS(\lambda)\, d\lambda \qquad (1)$$

donde SPD(λ) es la distribución de potencias espectral (W/nm) y AS(λ) la eficiencia fotosintética relativa de cada longitud de onda. A partir de los datos obtenidos por el fabricante Hispania [9] para una lámpara de 3000K –véase Tabla 1-, se aplicará el procedimiento para la obtención del factor de conversión. La lámpara elegida será de 3000K, por tener un rango cercano al espectro rojo, necesario para la patata.

Tabla 1. Longitudes de onda (λ), distribución de potencia espectral (SPD) y espectro de acción (AS), para una lámpara LED de 3000 K de temperatura de color [9]

λ (nm)	SPD (W/nm)	AS
400	0,05	0,25
500	0,15	0,75
600	0,4	0,9
700	0,2	0,6

A la hora del cálculo se simplificarán estas integrales a modo de sumatorio, pues se desconocen las funciones mencionadas, disponiéndose solo de valores puntuales expuestos en la Tabla 1.

$$PPFD = \int_{400}^{700} \mathrm{SPD}(\lambda) \cdot AS(\lambda)\, d\lambda \approx \sum SPD_i \cdot AS_i \qquad (2)$$

De igual modo se procederá para el cálculo de $\mathrm{SPD}(\lambda)$.

$$\int_{400}^{700} \mathrm{SPD}(\lambda)\, d\lambda \approx \sum SPD_i \qquad (3)$$

Donde el factor de conversión (fc) se calcula como el cociente de ambos sumatorios.

$$f_c = \frac{\sum(SPD \cdot AS)}{\sum SPD} \approx 0{,}76 \qquad (4)$$

A partir del valor obtenido en (4) como factor de conversión, y del flujo de fotones fotosintéticamente activos máximo (PPFD) necesario para la patata que son de unos 680 μmol·m^{-2}·s^{-1}., se obtiene el valor de referencia requerido en luxes, valor que directamente se podrá obtener del software DialuxEVO.

$$LUXES = \frac{PPFD}{f_c} = 900\ lux \qquad (5)$$

Se observa que el valor de los luxes necesario serán aproximadamente 900 lux, para abastecer al cultivo de patata en su totalidad.

Tras una amplia búsqueda entre los fabricantes, se obtuvo finalmente con un consumo limitado, coste bajo y temperatura de color (ºK) de 3000 o 4000K, se escoge como opción óptima una luminaria con forma de campana, y cuyas características técnicas se reflejan en la tabla 2, tal y como se abordará en el siguiente apartado.

Tabla 2. Características técnicas de lampara seleccionada [9]

Característica	Valor
Potencia LED	50W ±1%
Tono de luz	CCT (3000K + 4000K + 6000K),
Eficiencia luminaria	120 lm/W
Luminosidad (Lm)	6.000 ± 5%

3. Resultados

A partir de la luminaria tomada como referencia se procede a la modelización en DialuxEVO. Dado que la estructura de partida consta de 5 cerchas expresamente colocadas para la iluminación. Tras valorar diversas disposiciones sobre las limitaciones definidas, se llega a una disposición de 7 luminarias por cercha, obteniendo así la distribución lumínica reflejada en la figura 3.a en lux. Con esta disposición se cubre:

a) Con respecto a los niveles de cantidad de luz necesaria, cuando la situación es la más desfavorable, que sería aquella que se produce cuando el aporte de luz natural sea nula o casi nula, situación que se produce por ejemplo cuando se tenga la estructura totalmente cerrada. Se observa que se alcanza el objetivo definido con anterioridad, con un nivel medio del orden de 900 lux, equivalentes a los 680 μmol·m^{-2}·s^{-1}, que se necesitan como máximo en nuestro cultivo.

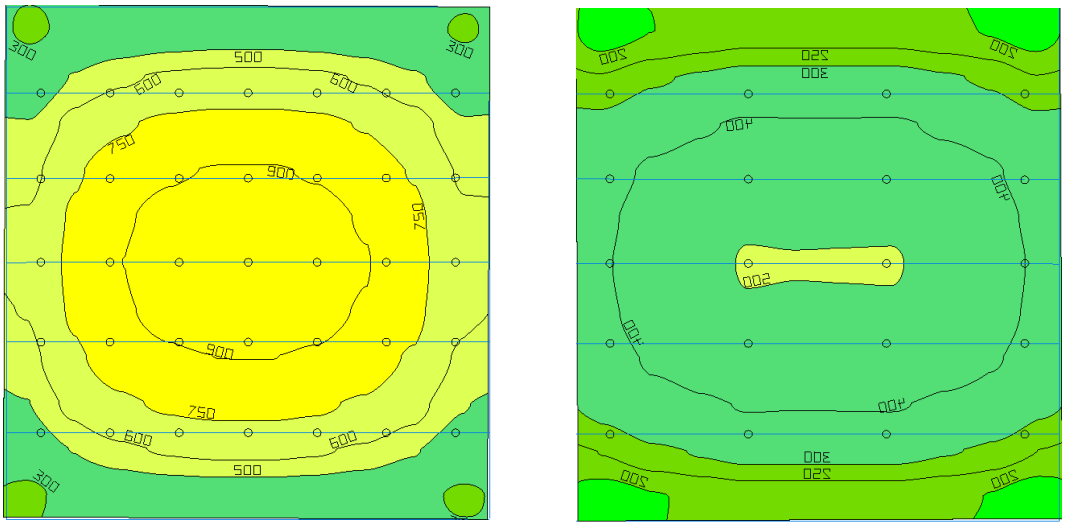
b) Cuando las necesidades de cantidad de luz, sean inferiores, por control del apagado y encendido de las correspondientes luminarias, se conseguirá un aporte de luz artificial que busque complementar la posible existencia de una luz natural insuficiente, de forma que como se muestra en la figura 3.b, un simple apagado alternado de nuestras luminarias de cada cercha, pasando cada cercha

de 7 a 4 luminarias, consigue un nivel de iluminación máximo del orden de la mitad obtenido anteriormente, es decir, valores entre 400 y 500 lux, equivalentes a 302 y 375 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Es interesante indicar que este valor es coincidente con las necesidades de la patata en algunas fases fenológicas del crecimiento de nuestro cultivo.

c) Con respecto a la uniformidad obtenida, como se observa en las gráficas de la figura 3.a y 3.b, las curvas isolux son del tipo rectangular y en la zona de estudio las variaciones son mínimas. Estas imágenes ya por si mismas, nos informan de que el nivel de uniformidad es muy alto, aspecto muy determinante en la elección de la óptica de nuestra luminaria. Teniendo en cuenta la altura, separación de las luminarias, se eligió una luminaria con un ángulo de haz adecuado para conseguir tal fin.

d) Para lograr una eficiencia energética de la instalación de alumbrado lo más alta posible, se buscaron entre aquellas luminarias del mercado, cuyos valores de eficiencia (lm/W) fueran altas. En nuestro caso, como se observa en la tabla 2, la luminaria elegida tenía un valor de 120 lm/W. Aunque en este entorno no es significativo, el valor de eficiencia energética de la instalación (VEEI), en las zonas de estudio, son respectivamente para ambas disposiciones (3.a y 3.b) del orden de 28,12 y 18,75 W/m^2, valores claramente elevados e indicativos de lo eficiente de esta instalación.

Por último, a partir de todos los resultados expuestos se define un sistema de control basado en apagados y encendidos de luminarias, -ya que las luminarias elegidas finalmente no tienen regulación del flujo luminoso-, para ello, se deberán colocar de forma estratégica sensores PAR, que mida la cantidad de luz que llega a nuestro cultivo, con la lectura obtenida y el valor de referencia que deberá incluir el microprocesador –cantidad de luz ideal en el cultivo-, deberá conectar o desconectar las líneas de alimentación oportunas para conseguir que el nivel de luz que llegue al cultivo esté lo más cercano en cada momento (fotoperiodo) a su valor ideal. La parte del control no es objeto del presente artículo.



(a) (b)

Figura 3. a) Distribución lumínica en lux, para 7 lampara encendidas por cercha (imagen izquierda) y b) para 4 lámparas con encendido como el mostrado en la figura (imagen derecha).

Para ambos cálculos se considera una altura de cultivo máxima de 20 cm y una altura desde el suelo a la cercha de 4,20 m, teniendo pues una distancia teórica de la fuente de luz a la planta de 4 m.

4. Conclusión

En síntesis, se obtiene un modelado que genera las necesidades máximas requeridas por nuestro cultivo de patata. Habiendo fijado como techo los 900 lux máximos requeridos, y con capacidad de regulación a aproximadamente a la mitad fácilmente, lo cual supone aproximadamente 380 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [8], suplementados correctamente con una disposición de 4 luminarias encendidas de las 7 luminarias existentes por cercha, ilustrado en la Figura 2.b.

Cabe destacar que este diseño está pensado para aportar íntegramente los requerimientos lumínicos de la planta propuesta, pero en la aplicación de campo, todo este sistema va a tener especialmente una función complementaria a los aportes lumínicos naturales provenientes desde el sol. Ya que en ciertos momentos las placas se solaparán alternativamente, permitiendo el paso de radiación solar. Dejando a su vez zonas sombreadas, en las que las lámparas añadirán esa energía restante.

Con respecto a aquellos aspectos relacionados con la viabilidad de la instalación, como son, el consumo energético de nuestra instalación de alumbrado y la eficiencia lumínica de la misma, hay que indicar que, encontrar fuentes lumínicas

que cumplieran las restricciones de longitudes de onda, potencia y precio, no fue tarea simple.

Con respecto a posibles líneas de futuro, es importante indicar que, las posibilidades de implantar este tipo de instalaciones de alumbrado, va a mejorar en la medida que las tecnologías de la iluminación -básicamente LED actualmente-, mejoren en aspectos relacionados con el costo económico de nuestras luminarias y del consumo que hoy por hoy tiene cada una de estas luminarias, ya que la capacidad de regulación presente en las mismas está muy lograda a fecha de hoy.

Financiación: VOLTAGRO. Proyecto financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU en el marco de las convocatorias de ayudas destinadas a proyectos de desarrollo y otras tecnologías digitales y su implantación e integración en cultivos y el sector agrario. C007-24JL

Referencias

1. La Región en cifras. https://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=1619&IDTIPO=100&RASTRO=c$m25987,127,1604 (2025, marzo 20)
2. Nájera, C.; Gallegos-Cedillo, V.M.; Ros, M.; Pascual, J.A. LED Lighting in Vertical Farming Systems Enhances Bioactive Compounds and Productivity of Vegetables Crops. *Biol. Life Sci. Forum* **2022**, *16*, 24. https://doi.org/10.3390/IECHo2022-12514
3. N. Grazziotin, G. Buriol, G. R. Silveira, D. H. Thomas and M. A. D. Costa, "LED Lighting Systems with Dedicated Light Spectra Applied to Flower Cultivation," *2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Nashville, TN, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IAS54024.2023.10406508.
4. E. Goto, (2003) "Effects_of_Light_Quality_on_Growth_of_Crop_Plants_under_Artificial_Lighting", *Environment Control in Biology,* vol. 41, pp 121-132, /doi.org/10.2525/ecb1963.41.121.
5. Rahman, M.H.; Islam, M.J.; Mumu, U.H.; Ryu, B.-R.; Lim, J.-D.; Azad, M.O.K.; Cheong, E.J.; Lim, Y.-S. The Growth and Tuber Yield of Potatoes (*Solanum tuberosum* L.) under Varying LED Light Spectrums in Controlled Greenhouse Conditions. *Horticulturae* **2024**, *10*, 254. https://doi.org/10.3390/horticulturae10030254
6. Planificación de la iluminación de las plantas | Crescience. https://cre.science/es/lonas-de-iluminacion-para-plantas/ (2025, marzo 10).
7. Thimijan, R. W., & Heins, R. D. (1983). Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. HortScience, 18(6), 818-822. Retrieved Mar 24, 2025, https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818
8. Sipos, L., Boros, I. F., Csambalik, L., Székely, G., Jung, A., & Balázs, L. (2020). Horticultural lighting system optimalization: A review. Scientia Horticulturae, 273, Article 109631. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631
9. LED Hispania. (2025). LED Hispania. https://ledhispania.com (2025, marzo 10)

Estimación del contenido de Nitrógeno y Clorofila en el Cultivo de Alfalfa mediante Imágenes Multiespectrales de Drones

Ouiam Fatiha Boukharta[1], Ines Gómez Delgado[1], Diana Carolina Polanía Montiel[1,2], José Luis Marco-Robles[1] and Luis Manuel Navas Gracia [1,*]

1 Grupo de Investigación TADRUS, Departamento de Ingeniería Agraria y Forestal, Universidad de Valladolid, España; ouiamfatiha.boukharta@uva.es , ines.gomez.delgado@estudiantes.uva.es and luismanuel.navas@uva.e

2 Universidad Surcolombiana, Facultad de Ingeniería; carolina.polania@usco.edu.co

* Correspondence: luismanuel.navas@uva.e

Resumen: La alfalfa constituye uno de los cultivos forrajeros más relevantes en España, siendo especialmente destacado en la región de Castilla y León. Esta leguminosa requiere una especial atención en cuanto a sus niveles de nitrógeno y clorofila, que determinan en gran medida el desarrollo y la productividad de la planta. La presente investigación evalúa la eficacia de la teledetección mediante drones con sensores multiespectrales para estimar el contenido de nitrógeno y clorofila en cultivos de alfalfa, comparándola con métodos tradicionales de medición. El estudio se realizó en Viñalta (Palencia) combinando a la teledetección con dron frente a mediciones con SPAD. El muestreo en campo se efectuó en diez puntos aleatorios en cuatro momentos del desarrollo fenológico del cultivo, y los vuelos con dron se realizaron simultáneamente a cada muestreo. Se observaron diferencias significativas entre los niveles de nutrientes en la parte superior e inferior de las plantas, siendo mayor la concentración en las hojas superiores debido a su mejor exposición lumínica y mayor capacidad de captación. Este estudio proporciona la base fundamental para futuros estudios científicos relacionados con la estimación de nitrógeno y clorofila mediante teledetección con drones en el cultivo de la alfalfa.

Palabras clave: Alfalfa; teledetección; drones; Pix4D Software, SPAD, España

1. Introducción

La alfalfa es uno de los cultivos forrajeros más importantes a nivel mundial [1], destacando por su alto valor nutricional y amplia adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas [2]. En España, la producción de alfalfa juega un papel fundamental en el sistema agropecuario, aportando materias primas esenciales para la alimentación del ganado y contribuyendo a la seguridad alimentaria del país [3]. En función del área dedicada al cultivo de alfalfa en las distintas Comunidades Autónomas en España, destaca Castilla y León como la región principal, seguida por Andalucía y Castilla La Mancha.

La alfalfa (Medicago sativa L.) es una especie forrajera perteneciente a la familia de las leguminosas que se utiliza ampliamente en alimentación animal originaria del suroeste de Asia [4]. Se trata de una planta perenne herbácea con una altura de entre 10 y 80 cm. Se caracteriza por sus hojas trifoliadas, compuestas por foliolos obovados con márgenes aserrados. Sus flores presentan una corola de color violeta o amarilla y se agrupan en racimos. Las semillas se alojan en el interior de unas vainas arrolladas en espiral, con 2-3 espiras.

La alfalfa es una leguminosa muy valorada en alimentación animal debido a que es capaz de sintetizar el nitrógeno atmosférico y aportar una gran riqueza de fibra y proteína de calidad. Presenta un valor energético alto y es una fuente de minerales como el potasio, el magnesio o el azufre [5]. La planta es muy sensible a la salinidad, que puede causar palidez en los tejidos, reducción del tamaño de las hojas y detención del crecimiento. Además, el cultivo requiere suelos profundos y bien drenados [6]. La rotación de cultivos es la clave para evitar la propagación de plagas y enfermedades y el desarrollo de estas enfermedades. Se recomienda una rotación con cereales y gramíneas forrajeras con un intervalo de al menos 2 años [6]. Esta leguminosa requiere una especial atención en cuanto a sus niveles de nitrógeno y clorofila, elementos fundamentales tanto para la síntesis proteica como para el proceso fotosintético, que determinan en gran medida el desarrollo y la productividad de la planta.

El Nitrógeno (N) es uno de los tres macronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas fundamental en el proceso de formación de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila en las plantas [7]. Las plantas que experimentan deficiencias en nitrógeno experimentan un crecimiento lento, sus hojas más viejas adquieren un color verde pálido y son más pequeñas. Las fuentes de nitrógeno aplicadas a la alfalfa pueden ser de origen orgánico como el estiércol o compost o pueden provenir de origen mineral que presenta una alta concentración de nitrógeno disponible en forma de amonio, nitrato y urea [7].

La Clorofila (Chl) es un pigmento vegetal fundamental para la vida de las plantas, responsable tanto de su característico color verde como del proceso de fotosíntesis, donde transforma la energía lumínica en energía química. Durante este proceso, absorbe principalmente los rayos rojos y azules de la luz solar, convirtiendo seis moléculas de agua y dióxido de carbono en glucosa y oxígeno. En este contexto, la alfalfa sobresale como uno de los cultivos con mayor contenido de clorofila, gracias a su extenso sistema radicular que le permite absorber nutrientes desde grandes profundidades del suelo [8].

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la eficacia de la teledetección mediante drones equipados con sensores multiespectrales en la determinación precisa de los niveles de nitrógeno y clorofila en cultivos de alfalfa, estableciendo una comparativa con otras técnicas convencionales como las mediciones directas con SPAD. Los objetivos específicos se recogen a continuación: Implementar nuevas técnicas de monitorización y seguimiento de cultivos, Comparar los resultados obtenidos mediante la teledetección con drones y las mediciones tradicionales empleando el SPAD, Desarrollar y validar protocolos innovadores de seguimiento y evaluación del estado nutricional de un cultivo y Identificar y analizar las ventajas y limitaciones de la teledetección como herramienta de diagnóstico agrícola.

2. Materiales y métodos

En el presente estudio se han desarrollado procedimientos específicos para la obtención de datos orientados a la determinación de los niveles de nitrógeno y clorofila en el cultivo de la alfalfa.

2.1. Área de estudio

La parcela de estudio se encuentra localizada en el Centro Integrado de Formación Profesional Viñalta en las afueras de la ciudad de Palencia accediéndose a través de la carretera Ampudia-Palencia, en la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Las temperaturas oscilan entre los 0,64 ºC de mínima y los 18,62 ºC de máxima con una temperatura media anual de 11,95 ºC. Los meses con temperaturas más bajas son diciembre, enero y febrero y los veranos son cálidos. La precipitación total anual es de aproximadamente 435 mm distribuida de forma irregular a lo largo del año. Los meses más lluviosos son octubre y noviembre, mientras que los meses más secos son julio y agosto.

2.2. Recogida de datos

El proceso de muestreo contempló la selección de 10 puntos distribuidos aleatoriamente por la parcela, los cuales fueron debidamente señalizados con estacas para garantizar la precisión de su localización en futuras mediciones (Figura 1).

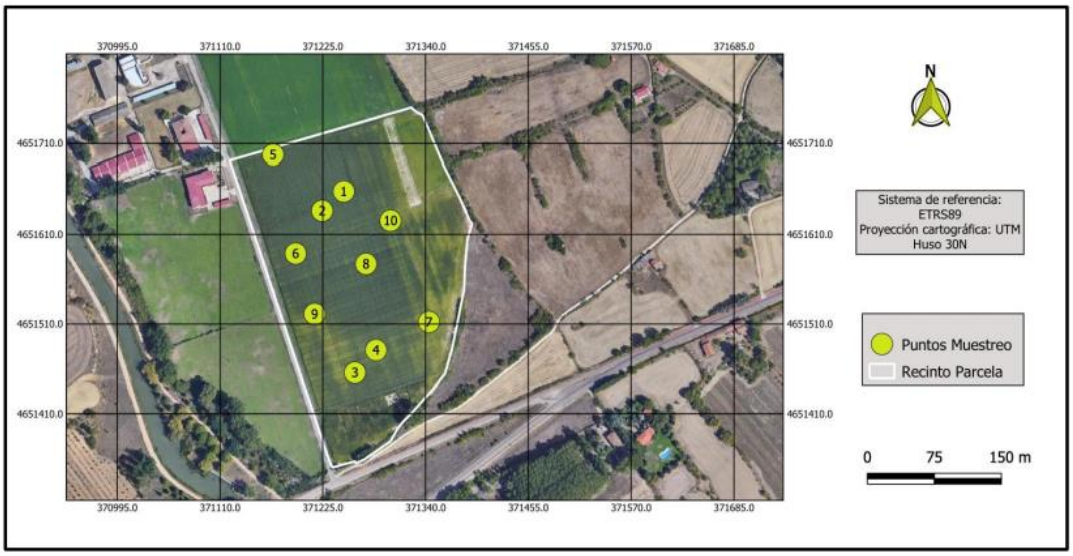


Figura 1: Ubicación de los puntos de muestreo en la parcela objeto de estudio en Viñalta. Escala: 1: 4000.

En cada punto de muestreo se procedió a recolectar información de dos plantas diferentes, extrayendo de cada una dos hojas: una hoja de la zona superior y otra de la zona inferior. La decisión de recoger dos hojas de cada planta pretende obtener una representación lo más completa posible de las características del cultivo. Las hojas superiores, al ser más desarrolladas, más antiguas y con mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes, proporcionan información crucial complementaria a la obtenida de las hojas inferiores (Figura 2).

2.3. Determinación de Nitrógeno y Clorofila

Para la técnica de medida directa mediante SPAD, se realizaron cuatro muestreos para los cuales se necesitaron tijeras para cortar las hojas, papel absorbente para evitar la deshidratación de las muestras, bolsas de plástico con cierre zip para el almacenamiento de las muestras, rotuladores permanentes para marcarlas, nevera para la conservación de las muestras y spray de agua para humedecerlas además del SPAD para analizar los contenidos de nitrógeno y clorofila de las plantas.

Figura 2: Medida directa mediante SPAD en el cultivo de alfalfa de la parcela estudio de Viñalta.

El muestreo del cultivo de alfalfa iniciado tras su corte el 25 de abril de 2024, se desarrolló en cuatro momentos durante los meses de mayo y junio del año 2024. La primera medición se realizó el 16 de mayo de 2024, en fase vegetativa de la alfalfa, implementando un método de muestreo cuidadosamente planificado para asegurar la representatividad de los resultados.

Una vez recolectadas, las hojas fueron analizadas in situ utilizando el SPAD para obtener el Índice de Balance de Nitrógeno (NBI) y el contenido en flavonoides, antocianinas y clorofila del cultivo. Estas mediciones se recogieron en hojas de cálculo de Excel para posteriormente, poder obtener promedios y estadísticas de los datos obtenidos en la parcela.

2.4. Teledetección con drones

Las adquisiciones aéreas se realizaron el mismo día en el que se tomaron en campo las mediciones con el SPAD, la misión se realizó a una altitud de 50 m, a una velocidad aproximada de 4,4 m/s y con una duración de 20 minutos de cada vuelo en cada muestreo de la parcela evaluada (Figura 3).

Figura 3: Dron DJI Mavic 3M en los muestreos de la parcela de Viñalta.

Para la elaboración de la ortofoto y los índices de vegetación, las imágenes fueron procesadas utilizando el software Pix4Dmapper. el flujo de trabajo se realizó de forma estándar para imágenes RGB y multiespectrales, aplicando las configuraciones "3D Maps" y "Ag Multispectral" respectivamente. El software Pix4D es líder en el campo de la fotogrametría y especializado en el procesamiento de imágenes capturadas desde diferentes perspectivas, ya sea por drones, aviones o dispositivos móviles [9].

2.5. Índices de vegetación

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un parámetro que mide el vigor y salud de la vegetación utilizando la información captada por sensores remotos en dos bandas espectrales específicas: el rojo y el infrarrojo cercano [10]. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) es una variante avanzada del NDVI que utiliza la banda verde en lugar de la roja. Su principal característica es una mayor sensibilidad para detectar variaciones de clorofila, siendo especialmente útil para evaluar el estado nutricional de cultivos en etapas avanzadas de crecimiento [10]. El Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) es un índice espectral diseñado para medir el contenido de clorofila en las plantas, lo que lo convierte en un indicador clave de su salud y estado nutricional [11].

2.6. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó XLSTAT, un software que opera como complemento de Microsoft Excel y que proporciona funcionalidades estadísticas avanzadas, incluyendo análisis descriptivos e inferenciales, modelización predictiva, análisis multivariante, diseño experimental, series temporales y control de calidad [12]. La elección de este software permitió realizar todos los análisis requeridos en

el estudio de manera eficiente y generar resultados fiables para su posterior interpretación.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados con SPAD y dron

Durante el muestreo en la parcela de alfalfa, se tomaron 4 mediciones por punto y fecha usando el SPAD. Aunque el dispositivo registró datos de clorofila, nitrógeno, flavonoides y antocianinas (almacenados en Excel como se muestra en la Figura 4), el análisis se centrará únicamente en los valores de nitrógeno y clorofila. Estos parámetros serán posteriormente correlacionados con los índices de vegetación derivados de las imágenes capturadas por el dron.

16/05/2024	SPAD	Planta 1		Planta 2	
		Hoja baja	Hoja alta	Hoja baja	Hoja alta
Punto 1	NBI	10,1	12,8	18,9	16,4
	Chl	10,3	13,9	28,0	18,6
	Flav	1,02	1,09	1,48	1,14
	Anth	0,29	0,27	0,17	0,24
Punto 2	NBI	27,6	16,9	21,0	19,7
	Chl	37,1	24,8	30,0	28,8
	Flav	1,34	1,47	1,43	1,46
	Anth	0,13	0,20	0,18	0,19

Figura 4: Ejemplo de los datos tomados en campo por el SPAD en dos puntos diferentes en la fecha del 16/05/2024. NBI = Índice de Balance de Nitrógeno; Chl = Clorofila; Flav = Flavonoides; Anth = Antocianinas

Los índices de vegetación de cada punto de muestreo fueron generados a través de las ortofotos obtenidas mediante Pix4Dmapper, procesando las imágenes capturadas por el dron DJI Mavic 3M durante las mediciones con SPAD. Tras obtener los valores de los índices en cada punto, se calculó un promedio para simplificar todos los datos de cada índice en un único valor por punto y fecha, resultando en 10 valores por índice para cada fecha. A partir de estos valores de proteína bruta, se calculó el contenido de nitrógeno utilizando el factor de conversión 1/6,25, que es el recomendado para el cultivo de alfalfa.

3.2. Correlación entre los índices de vegetación y el nitrógeno y la clorofila

3.2.1. Nitrogeno y clorofilia

Una vez completada la recolección de datos del SPAD y el procesamiento de las imágenes capturadas por el dron, se procederá a realizar un análisis correlacional. Este análisis comparará los diversos índices de vegetación con los niveles de nitrógeno y clorofila medidos. Esto permitirá determinar cuál de los tres índices de vegetación evaluados demuestra mayor eficacia y precisión para predecir la

concentración de estos nutrientes esenciales utilizando técnicas de teledetección con drones.

Primeramente, se analiza la evolución del nitrógeno y la clorofila medidos mediante el SPAD en la parcela de alfalfa objeto de estudio representada para la parte alta y para la parte baja (Figura 5). En ambas partes se observa que los valores de nitrógeno se mantuvieron, en general, por debajo de los niveles de clorofila.

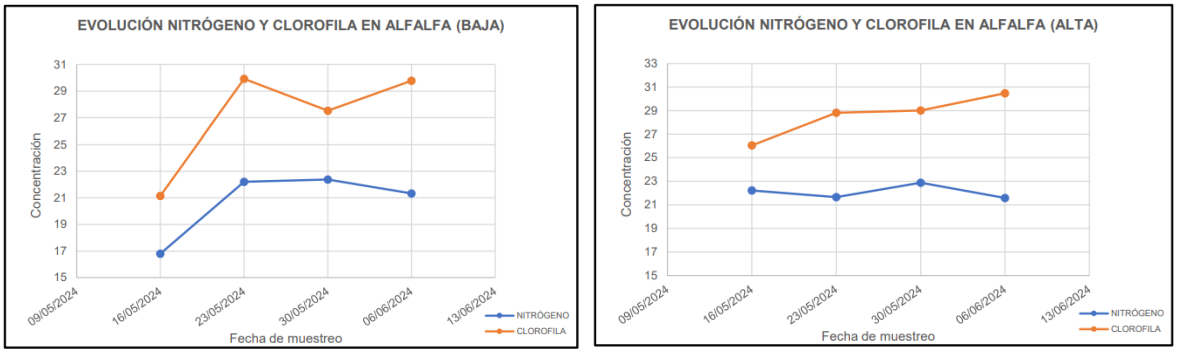


Figura 5: Evolución del nitrógeno y la clorofila medido mediante el SPAD en la parte alta del cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo.

La parte alta mantuvo niveles más estables de nitrógeno a lo largo del ciclo, oscilando entre 21 y 23, lo que indica que el cultivo no experimentó deficiencias significativas de este nutriente en ningún momento. En contraste, en la parte baja de la parcela, el contenido de nitrógeno mostró una tendencia ascendente inicial, alcanzando su punto máximo de aproximadamente 22 el 23 de mayo durante la segunda medición. Posteriormente, se observó un descenso gradual que culminó en una disminución pronunciada.

La evolución de los niveles de clorofila mostró un patrón dinámico tanto en la parte alta como en la parte baja del cultivo. Inicialmente, se observó un incremento que alcanzó su punto máximo de 30 el 23 de mayo. Tras alcanzar este pico, los valores experimentaron una caída en la siguiente medición, seguida de una fase de recuperación. Es notable destacar que estos cambios fueron más pronunciados en la zona baja del cultivo, donde las fluctuaciones se manifestaron de manera más abrupta.

3.2.2. Índices de vegetación: NDRE, NDVI y GNDVI

La Figura 6 ilustra la evolución de los diferentes índices de vegetación durante el ciclo de la alfalfa. Los resultados muestran que el NDRE presentó valores considerablemente más bajos que el NDVI y el GNDVI.

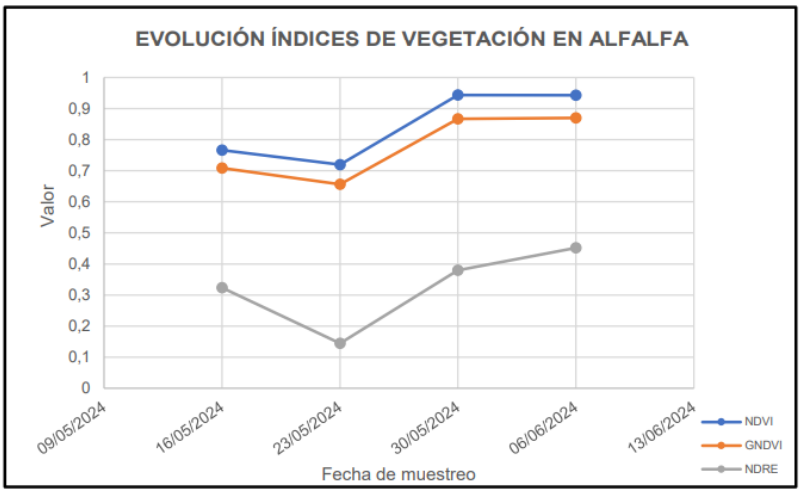


Figura 6: Evolución de los índices de vegetación obtenidos a través de la teledetección con drones en el cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo.

Estos dos últimos índices mostraron patrones de evolución prácticamente idénticos, aunque el GNDVI mantuvo valores ligeramente inferiores. Ambos índices experimentaron inicialmente un descenso, seguido de un leve incremento, para finalmente estabilizarse en un rango entre 0,65 y 0,95. El NDRE, por su parte, mostró un comportamiento diferente, caracterizado por una disminución inicial hasta el 23 de mayo, seguida de un aumento gradual, manteniéndose en un rango entre 0,3 y 0,45. La evolución seguida por los índices en ambas partes del cultivo ha sido semejante.

3.2.3. Análisis estadístico exhaustivo con XLSTAT

Los resultados del cultivo de alfalfa se recogen en la Figura 7. En la parte alta se observa una relación directa entre el nitrógeno y la clorofila con en el NDRE en la fecha del 16 de mayo durante la fase vegetativa. El 23 de mayo durante la fase de botón floral como se ha comprobado en pruebas anteriores, existe una relación inversa entre el nitrógeno y el NDRE. En la del 30 de mayo durante la fase de floración se observa correlaciones directas entre el nitrógeno y la clorofila con el NDVI y el NDRE siendo ligeramente superior en el caso del NDVI. Y en el último muestreo en plena fructificación se observan fuertes correlaciones entre la clorofila y los tres índices siendo ligeramente superior la del GNDVI además de una correlación directa entre el nitrógeno y el NDVI.

ALTA			BAJA		
16/05/2024	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**	**16/05/2024**	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**
NDVI	0,125	-0,266	**NDVI**	-0,160	0,010
GNDVI	0,118	0,001	**GNDVI**	0,130	0,272
NDRE	**0,355**	**0,363**	**NDRE**	0,208	**0,386**
23/05/2024	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**	**23/05/2024**	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**
NDVI	-0,243	-0,183	**NDVI**	0,263	0,251
GNDVI	-0,202	-0,247	**GNDVI**	0,232	0,217
NDRE	**-0,496**	-0,121	**NDRE**	0,108	**0,304**
30/05/2024	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**	**30/05/2024**	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**
NDVI	**0,392**	**0,469**	**NDVI**	**0,385**	0,282
GNDVI	0,113	0,183	**GNDVI**	0,174	0,297
NDRE	**0,304**	**0,301**	**NDRE**	**0,356**	0,178
06/06/2024	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**	**06/06/2024**	**NITRÓGENO**	**CLOROFILA**
NDVI	**0,422**	**0,817**	**NDVI**	**0,378**	0,136
GNDVI	0,274	**0,844**	**GNDVI**	**0,339**	0,163
NDRE	0,185	**0,604**	**NDRE**	0,152	0,108

Figura 7:Resultados de la prueba estadística de Regresión No Paramétrica para las diferentes variables en todas las fechas del cultivo de alfalfa

En resumen, la parte superior del cultivo mantuvo niveles más estables de nitrógeno y clorofila durante todo el ciclo en comparación a la parte inferior, debido al efecto sombra que experimenta. Los índices de vegetación mostraron patrones distintivos, con NDVI y GNDVI presentando evoluciones similares, mientras que el NDRE mostró valores significativamente más bajos. Las correlaciones más significativas se concentraron en la parte alta del cultivo, donde se observó una correlación inversa entre el nitrógeno y el NDRE durante la fase de botón floral, y correlaciones directas entre la clorofila y los índices NDVI y GNDVI durante la fase de fructificación. La parte baja del cultivo mostró correlaciones menos pronunciadas pero significativas, principalmente entre la clorofila y el NDRE en los primeros muestreos, y entre el nitrógeno y los índices NDVI y GNDVI en la fase final.

4. Conclusión

Tras un análisis en profundidad de los datos obtenidos mediante drones de teledetección y su comparación con las técnicas convencionales de evaluación de los niveles de nitrato y clorofila en los cultivos de alfalfa, surgen varias conclusiones significativas.

En primer lugar, la evolución de los nutrientes en la alfalfa revela una disminución de los niveles de nitrógeno en la parte inferior de la cubierta vegetal. Este efecto puede explicarse por la sombra proyectada por las partes superiores de la cubierta, que limita la captación de energía solar, la absorción de nutrientes y el proceso de fotosíntesis. En segundo lugar, la eficacia de los distintos índices de vegetación extraídos de los orto-mosaicos generados por el sensor multiespectral montado en dron varía en función de la fase fenológica del cultivo. Esta observación pone de manifiesto la importancia de elegir índices específicos para cada fase de desarrollo. Durante la fase vegetativa, el NDRE es un indicador relevante de la clorofila debido

a la fuerte correlación entre ambos. Durante la fase de botón floral, este índice muestra una marcada correlación inversa con los niveles de nitrógeno, lo que lo convierte en un buen estimador de este elemento. Durante la floración, se observó una relación directa entre el nitrógeno y los índices NDVI y NDRE, sugiriendo su relevancia como indicadores en esta etapa. Finalmente, durante la fructificación, se encontró una correlación altamente significativa entre el contenido de clorofila y los índices NDVI y GNDVI, subrayando su papel clave en la estimación de la clorofila en esta etapa del ciclo.

Sin embargo, una limitación importante de este estudio es el corto ciclo de cultivo de la alfalfa. Para obtener resultados más sólidos y generalizables, sería esencial ampliar la experimentación a varios ciclos de crecimiento. Por último, esta investigación es uno de los primeros estudios que se realizan sobre alfalfa en España, y más concretamente en la región de Castilla y León, lo que refuerza el valor científico y aplicado de estos resultados para la agricultura local.

6. Patents

Contribuciones de los autores: Conceptualización, O.F.B, D.C.P.-M. and L.M.N.-G. ; metodología, L.M.N.-G., O.F.B and D.C.P.-M; software, I.G.D., O.F.B. and D.C.P.-M.; validación, L.M.N.-G., O.F.B. y I.G.D.; análisis formal, I.G.D., D.C.P.-M. and O.F.B.; investigación, O.F.B., I.G.D., L.M.N.-G. y D.C.P.-M.; recursos, L.M.N.-G.; conservación de datos, L.M.N.-G., O.F.B., D.C.P.-M. and I.G.D.; redacción del borrador original, I.G.D. and O.F.B.; redacción, revisión y edición, I.G.D., O.F.B., L.M.N.-G. and D.C.P.-M.; visualización, L.M.N.-G., O.F.B., I.G.D. and D.C.P.-M.; supervisión, L.M.N.-G., O.F.B. and D.C.P.-M.; administración del proyecto, L.M.N.-G.; obtención de financiación, L.M.N.-G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: The present work is related to the FUSILLI Project, which is funded by the European Un-574 ion's Horizon 2020 Research and Innovation program under the grant agreement No. 101000717 575 (https://fusilli-project.eu/) (accessed on 28 February 2025). Ouiam Fatiha Boukharta has been financed under the call for University of Val-578 ladolid 2021 predoctoral contracts, co-financed by Banco Santander.

Conflicts of Interest: Declare conflicts of interest or state "The authors declare no conflict of interest."

References

1. Martín, D. (2021, octubre 5). Cultivo de la alfalfa, todo lo que necesita saber. Esseeds. https://esseeds.com/blog/cultivo-de-la-alfalfa-guia-completa/
2. Annicchiarico, P. et al. (2011). Adaptation of landrace and variety germplasm and selection strategies for lucerne in the Mediterranean basin. Field Crops Research, 120(2), 283–291.
3. Jabri, C. et al. (2021). Discovering new genes for alfalfa (Medicago sativa) growth and biomass resilience in combined salinity and Phoma medicaginis infection stress. Frontiers in Plant Science, 12, 1348168.
4. Barnes, D. K. (2015). Alfalfa. En Hybridization of Crop Plants (pp. 177–187). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America.
5. Ralda, I. (2016). Alfalfa deshidratada y henificada para el ganado. https://www.iralda.com/productos/alfalfa/
6. Cherlinka, V. (2024, enero 18). Cultivo De Alfalfa: Siembra, Cuidado Y Cosecha Productivas. EOS Data Analytics. https://eos.com/es/blog/cultivo-de-alfalfa/

7. Sela, I. G. (2019, marzo 22). El nitrógeno en las plantas. Cropaia. https://cropaia.com/es/blog/nitrogeno-en-las-plantas/
8. Cabrales, R. A. (2023, febrero 8). ¿Por qué consumir clorofila de alfalfa? Millenium Natural Systems. https://sistemanatural.com/por-que-consumir-clorofila-de-alfalfa/
9. Pix4D: ¿Qué es y para qué sirve? (2022, agosto 28). UAVLatam - Soluciones Empresariales con Drones. https://uavlatam.com/pix4d-que-es-para-que-sirve-ejemplos/
10. Ramirez, G., Montes de Oca, A., & Flores, G. (2023). 3D maps of vegetation indices generated onboard a precision agriculture UAV. 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 564–571.
11. Boiarskii, B., & Hasegawa, H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. Journal of mechanics of continua and mathematical sciences, 1(4). https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003
12. Addinsoft. (2024). XLSTAT statistical and data analysis solution. Paris, France. https://www.xlstat.com

Conteo y detección de agave utilizando visión e inteligencia artificial en imágenes RGB de RPAS

J. J. Pérez-Paredes [1], G.J. López-Canteñs [1]*, R. Arteaga-Ramírez [1], J. C. Olguin-Rojas [2], E. Romantchik-Kriuchkova [1]

[1] Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo; josjan_@hotmail.com

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.

* Correspondencia: alelopez10@hotmail.com; Tel.: (+52 5959521500 ext.5556)

Abstract: Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) have been used to support automated plant counting and detection methods, displacing traditional methods. Therefore, this work aims to propose a methodology for the detection and counting of agave plants from RGB images. An orthomosaic of an agave plantation was generated, to which an "RGB" to "CIE 1976 LAB" color transformation was performed, then it was binarized and morphological operations were applied in order to segment the desired objects (agaves). In addition, the agave images were used to create a database, from which the 7 Hu invariant moments and the averages of the "CIE 1976 LAB" and "CIE 1931 XYZ" color space bands were extracted. Supervised learning models: Random Forests, Neural Networks, Support Machines and Logistic Regression were used to perform training and image classification, classification performance metrics were calculated and the results obtained in the models have considerable potential to efficiently detect and count the agave crop.

Keywords: Agave 1; Counting 2; Precision Agriculture 3; Artificial Vision 4; Artificial Intelligence 5; Machine Learning 6.

1. Introducción

El agave azul es una planta suculenta que crece en zonas áridas y cálidas, nativa de México y es la principal fuente para la producción de la bebida tradicional de tequila [1]. En la actualidad el tequila se consume en todo el mundo, por lo que el cultivo de agave es una actividad de importancia económica para los productores agrícolas [2] [3]

Los productores necesitan estimar el rendimiento de la plantación de agave para planificar y predecir la producción, el número de plantas de agave es uno de los parámetros que determina el rendimiento de la producción por lo que se requiere un control y seguimiento preciso del número de plantas de agave por superficie [4]

[1]. Mediante los inventarios se pueden responder cuestiones como la disponibilidad del agave, etapa vegetativa, ubicación (geolocalización), propietario, estado fitosanitario entre otras, para llevar un mejor manejo y control a lo largo de su ciclo vegetativo [5] [6].

La población de plantas determina la densidad de siembra (número de plantas por hectárea cultivada), esta estadística está directamente relacionada con diversos factores, como la gestión eficiente del agua, los fertilizantes o la susceptibilidad del cultivo a distintos patógenos y también desempeña un papel fundamental en la estimación de la producción del cultivo [7].

A pesar de la existencia de varias técnicas modernas en la agricultura mexicana, el seguimiento del cultivo del agave se realiza principalmente de forma manual con herramientas agrícolas, lo que requiere un gran esfuerzo para lograr una buena precisión de conteo [1].

El objetivo de este trabajo es utilizar ortomosaicos georreferenciados generados mediante imágenes aéreas RGB de alta resolución adquiridas por UAV o RPAS para detectar, geolocalizar y determinar el número de plantas de agave basado en la segmentación de imágenes y operaciones morfológicas, además de entrenar modelos de aprendizaje de clasificación supervisada para obtener un conteo más preciso.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio donde se realizaron los vuelos fotogramétricos está ubicada sobre la carretera Guadalajara-Tepic km 36.2, municipio de “El Arenal”, Jalisco México, ubicada geográficamente en las coordenadas 20°47’39.840”N y 103°42’1.800”O y consta de una superficie 1.3 hectáreas de una plantación de agave azul “Agave Tequilana Weber Var. Blue”. Esta área de estudio contaba con agave en etapa fenológica de crecimiento, desarrollo temprano y dispuestos en hilera, igualmente la parcela se caracteriza por la presencia de maleza y suelo desnudo en algunas partes del cultivo.

2.2 Adquisición de imágenes con RPAS y procesamiento fotogramétrico

Para la adquisición de las imágenes aéreas se utilizó un dron DJI Phantom 4 Pro V2.0 con una cámara RGB de 20 Mega pixeles. El vuelo tuvo lugar el 5 de septiembre del 2021, aproximadamente entre las 10 am y las 11 am, durante el vuelo se adquirieron un total de 304 imágenes RGB georreferenciadas. Para la planificación de la misión de vuelo se utilizó “DJI Pilot”, a una altitud de 40 m y con una velocidad de 3 m/s, con

superposiciones frontales y laterales del 80% y con un GSD de 1.10 cm/píxel. Con las imágenes adquiridas a través del vuelo se generó un ortomosaico correspondiente al área de estudio (Figura 1).

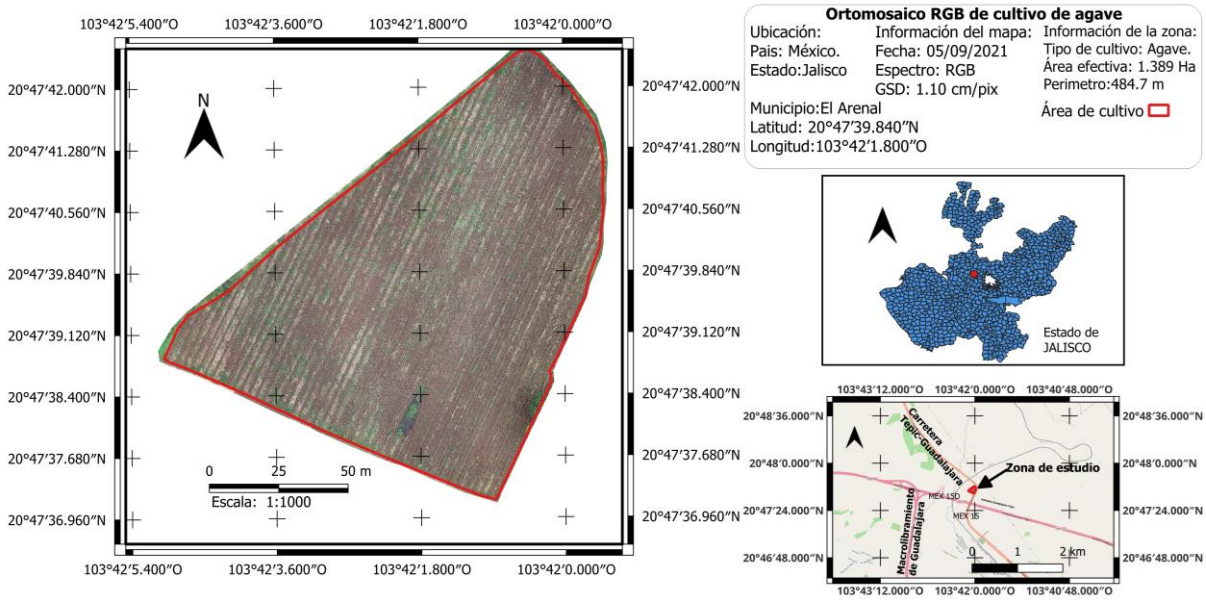


Figura 1. Ortomosaico de zona de estudio.

2.3 Transformación de espacio de color

El espacio de color RGB del ortomosaico (Figura 2), se convirtió a un nuevo espacio de color "CIE 1976 LAB" (Figura 3), el nuevo espacio de color posee una paleta de colores en la cual se pude diferenciar visualmente el agave (rojo) del suelo (blanco) y la maleza (morado).

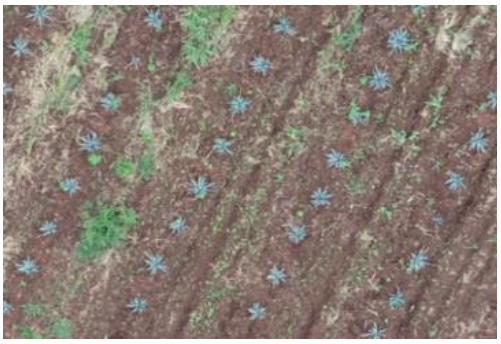


Figura 2. Imagen RGB, Ortomosaico.

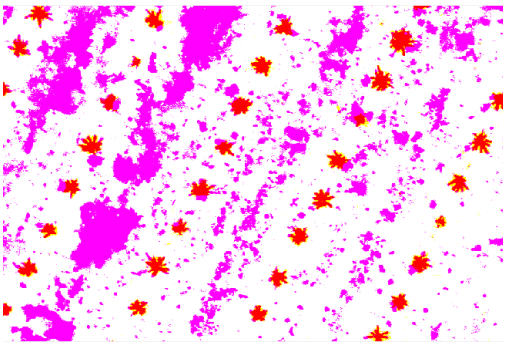


Figura 3. Imagen CIE 1976 LAB.

2.4 Binarización y operaciones morfológicas

Se binarizó la 3° banda correspondiente a las coordenadas amarillo/azul (B), de la imagen "CIE 1976 LAB", mediante el método auto-ajustativo de "Otsu". La imagen binaria convirtió los objetos deseados "agave" en 1 (blanco) y el suelo en 0 (negro).

La binarización descarto la vegetación no deseada como la maleza, aunque, presento ruido en forma de puntos blancos que fue eliminado mediante las operaciones morfológicas de relleno, cierre, dilatación y apertura descritas en el siguiente diagrama:

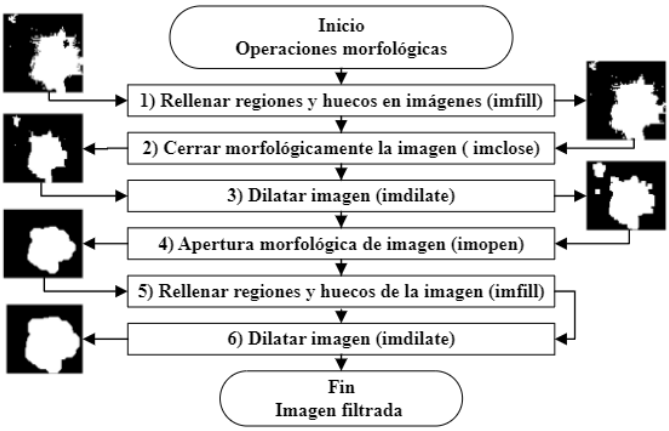


Figura 4. Operaciones morfológicas utilizadas.

2.5 Detección y conteo de plantas

Para el conteo se utilizó la función “regionprops” (Matlab 2021), sobre la imagen binaria, que calculó propiedades de área y centroides, además, ayuda a generar un marco delimitador de cada uno de los objetos. Para calcular los centroides se utilizó el comando “centroid”, que calcula las posiciones en “X” y “Y” de cada objeto, también se utilizó el comando “propied().BoundingBox.” que generó un marco delimitador de cada uno de los objetos (agaves).

La Figura 4 se muestra la detección de cada uno de los objetos sobre la imagen binaria, y la Figura 5 una máscara sobre la imagen RGB, en donde se visualiza cada uno de los agaves con su respectivo marco delimitador (□) y su centroide (∗).

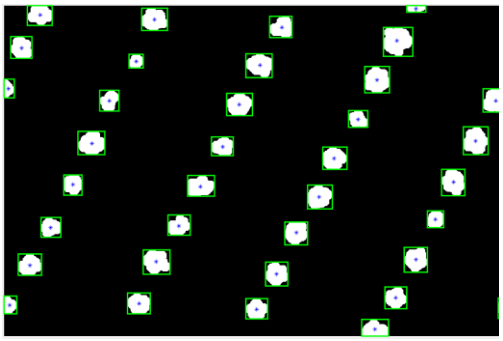


Figura 4. Detección de objetos en imagen binaria.

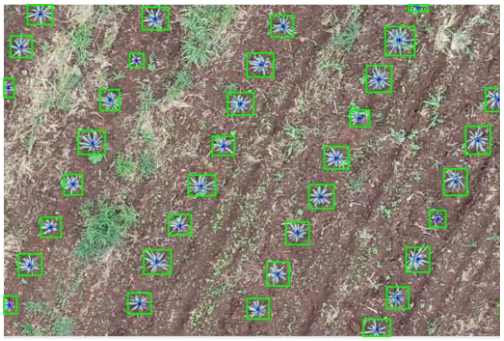


Figura 5. Mascara en imagen RGB.

2.6 Modelos de aprendizaje (Machin learning)

Como se muestra en la Figura 6 (binaria) y Figura 7 (RGB) se generó un error (no agave), el cual se mantienen a un aplicando las operaciones morfológicas utilizadas, para descartar estas figuras y tener una mejor precisión de conteo, se utilizó modelos de aprendizaje supervisado (Machin learning) para poder descartar cualquier objeto generado de manera errónea en la segmentación.

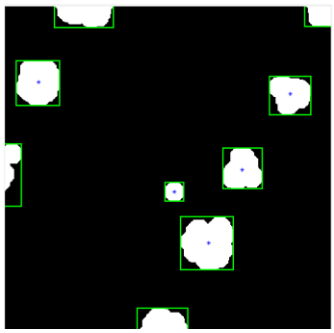


Figura 6. Imagen binaria con detección de objetos

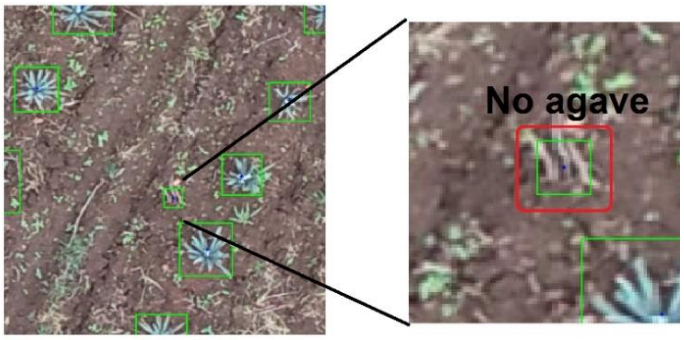


Figura 7. Error (No agave)

Para el entrenamiento se utilizaron los recortes de las 4050 imágenes de los objetos detectados, de los cuales 3960 pertenecían a agaves y 90 a no agaves. Para tener un entrenamiento con información más homogénea se generaron 3601 recortes de imágenes nuevas de "no agave", por lo que la muestra total aumento a 7651 imágenes (3960 imágenes de agave y 3691 imágenes de no agave).

Se realizó la descripción y extracción de las características de cada una de las imágenes, en donde se identificó cualidades de los recortes de las imágenes para obtener información cuantitativa fundamental que diferenciaron las 2 clases (agave y no agave).

Para la obtención de características se utilizaron los momentos de Hu que son 7 momentos invariantes a la rotación, escala y traslación, y se calculan a partir de los momentos normales, en donde se parte de los momentos ordinarios de una función continua bidimensional $f(x, y)$ con el momento de orden $(p + q)$, y se define en la siguiente ecuación:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q \, f(x, y) dx \, dy \qquad (1)$$

Se extrajeron 6 características extras para la clasificación. Se transformaron los recortes de imágenes "RGB" al espacio de color "CIE 1976 LAB" y "CIE 1931 XYZ", y se calculó el promedio del valor de los pixeles de cada banda (3 bandas por cada espacio de color), por lo que se generara un total de 13 características (Tabla 1).

Tabla 1. Características generadas de cada recorte.

	Momentos invariantes de Hu (recorte RGB)							**Espacio de color CIE 1976 Lab**			**Espacio de color CIE 1931 XYZ'**			**Respuesta deseada**
	C:1	C: 2	C 3	C:4	C:5	C:6	C:7	C:8	C:9	C:10	C:11	C:12	C:13	Clase (Binaria)
Nm	Mom Hu: 1	Mom Hu: 2	Mom Hu: 3	Mom Hu: 4	Mom Hu: 5	Mom Hu: 6	Mom Hu: 7	Prom B 1	Prom B 2	Prom B 3	Prom B 1	Prom B 2	Prom B 3	1: Agave 0:No agave
1	0.001978	6.16181E-08	1.04836E-11	6.72124E-14	4.880E2	1.184E-17	302E-26	54.6096361	0.0165763	2.5925969	0.244429	30.256975	0.2684909	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7651	0.00091016	2.30254E-08	4.70226E-13	6.8854E-13	-3.10E-26	2.96613E-17	3.905E-25	75.3070065	-1.56059445	11.0401967	0.468008842	0.4988 5824	0.43987118	0

Donde: C:n = Característica , n=1,2,3...13, Nm=Numero de muestras de 1,2,3 ... 7651, Mom= Momento invariante de Hu, Prom= Promedio de banda.

El aprendizaje utilizado fue el supervisado con una clasificación binaria y se utilizó el conjunto de datos de entrenamiento de cada imagen para enseñar a los modelos a generar la salida deseada “agave”=1 y “no agave”=0. Los datos se dividieron en dos secciones, se utilizó el 80% para datos de entrenamiento y el 20% restante para datos de validación.

Se utilizaron los mejores hiper parámetros para cada clasificador obtenidos por el método de la rejilla, los modelos de entrenamiento que se utilizaron fueron los siguientes

- Bosques Aleatorios (Random forest).
- Redes Neuronales (Neural networks).
- Máquinas de Soporte Vectorial (Support Vector Machine, SVM).
- Regresión Logística (Logistic regression).

Después del entrenamiento se realizó una validación cruzada con un “k -fold=5” y se evaluó el rendimiento de los modelos de clasificación con las métricas de desempeño.

3. Resultados

Empleando los métodos de binarización y operaciones morfológicas descritas se realizó una segmentación de agaves adecuada para poder identificarlos correctamente, se detectaron 4,050 plantas en las 1.38 Ha, dando una densidad de 2,935 plantas/Ha. Sin embargo, se encontraban 90 objetos que correspondían a no agaves (errores), por lo que el 97.78% de los cuerpos segmentados corresponde a imágenes correctas y un 2.22% a imágenes incorrectas.

Se evaluaron los modelos de aprendizaje con las métricas de desempeño y se muestran los resultados para cada modelo en la Tabla2; Máquinas de Soporte

Vectorial (SVM) y Regresión Logística generaron las mejores métricas de desempeño en comparación de Bosques Aleatorios (Random forest) y Redes Neuronales (Neural networks), aun así, las 4 posen buenos parámetros de desempeño arriba del 0.99 en las métricas calculadas (Tabla 2).

Tabla 2. Métricas de desempeño de clasificación

Modelo	**Exactitud (accuracy)**	**Precisión**	**Sensibilidad (Recall):**	**Puntaje F1: (F1-Score)**	**Validación cruzada K fold=5**
Bosques Aleatorios	0.9928151	0.994565	0.99052774	0.9925423	accuracy: 0.991 +/- 0.001
Redes Neuronales	0.9928151	0.994565	0.99052774	0.9925423	accuracy: 0.992 +/- 0.002
Máquinas de Soporte Vectorial	0.9947746	0.998635	0.99052774	0.9945652	accuracy: 0.992 +/- 0.002
Regresión Logística	0.9947746	0.998635	0.99052774	0.9945652	accuracy:0.991 +/- 0.001

Las matrices de confusión de los modelos, que están a continuación, muestran que la Tasa de verdaderos positivos (TPR) se encuentra arriba del 99.5% en la clasificación.

Tabla 3. Matriz de Confusión 1

Modelo: Bosques Aleatorios			
Clase Verdadera	0	732	7
	1	4	788
		0	1
		Clase Predicha	

Tabla 4. Matriz de Confusión 2

Modelo: Redes Neuronales			
Clase Verdadera	0	732	7
	1	4	788
		0	1
		Clase Predicha	

Tabla 5. Matriz de Confusión 3

Modelo: Maquina de Soporte Vectorial			
Clase Verdadera	0	732	7
	1	1	791
		0	1
		Clase Predicha	

Tabla 6. Matriz de Confusión 4

Modelo: Regresión Logística			
Clase Verdadera	0	732	7
	1	1	791
		0	1
		Clase Predicha	

4. Discusión

En las imágenes los agaves poseen una separación significativa entre ellos debido a su estado vegetativo joven por lo que el uso de las técnicas de segmentación que se utilizaron detectó de manera eficiente los agaves sin que existiera un traslape entre objetos y se generara errores de conteo. Se realizaron pruebas con agaves en una

etapa más desarrollada, pero por la cobertura existente entre ellos se traslapaban, generando errores de conteo, pero si segmentaba de manera eficiente, por lo que se sugiere el uso de otros filtros para determinar el número de objetos de manera correcta. Aun asi este método funciona eficientemente en cultivos jóvenes y puede ser utilizado en otras especies.

5. Conclusiones

Se ha presentado un sistema para la detección y conteo de plantas de agave con el fin de mejorar el seguimiento del cultivo, determinar la densidad de población, usando técnicas de procesamiento de imágenes y modelos de aprendizaje supervisado para la clasificación de agave, usando imágenes aéreas tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado.

El algoritmo de detección y conteo propuesto se basa en la segmentación mediante una imagen binaria obtenida de una banda del espacio de color “CIE LAB”. La propuesta combina los resultados del algoritmo de segmentación para realizar recortes y utilizarlos en modelos de aprendizaje supervisado para entrenamiento y validación, los modelos utilizados (Bosques Aleatorios, Redes Neuronales, Máquinas de Soporte Vectorial y Regresión Logística), son capaz de clasificar las plantas de “agave” y “no agave” con las 13 características extraídas en cada imagen, los modelos obtuvieron métricas de desempeño de clasificación de: Exactitud, Precisión, Sensibilidad y Puntaje F1 arriba del 0.9 por lo que los modelos presentaron excelentes rendimientos, siendo robustos para la clasificación adecuada de plantas a mayor escala, para trabajos futuros es necesario un aumento de imágenes para un mejor entrenamiento utilizando imágenes a diferentes alturas, resoluciones y etapas fenológicas del cultivo.

Referencias

1. Calvario, G., Alarcón, T. E., Dalmau, O., Sierra, B., & Hernandez, C. (2020). An Agave Counting Methodology Based On Mathematical Morphology And Images Acquired Through Unmanned Aerial Vehicles. Sensors (Switzerland), 20(21), 1–21. Https://Doi.Org/10.3390/S20216247
2. Gonzalez, D. R., Ceja Ramírez, R., Ruiz Corral, J. A., Rendón Salcido, L. A., & Flores Garnica, J. G. (2017). Detección De Restricciones En La Producción De Agave Azul (Agave Tequilana Weber Var. Azul) Mediante Percepción Remota. Revista Terra Latinoamericana, 35(3), 259. Https://Doi.Org/10.28940/Terra.V35i3.252
3. Garnica, J. G. F., Reich, R., Zuñiga, E. T., Bravo, C. A., Cirpac, I., Guadalajara, P. L. C. S. N., México, J., Forestal, D. D., & México, D. J. (2008). Using Remote Sensing To Support Different Approaches To Identify Agave (Agave Tequilana Weber) Crops. The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences. Vol. Xxxvii. Part B8. Beijing 2008 Analysis, 941–944. Http://Www.Isprs.Org/Proceedings/Xxxvii/Congress/8_Pdf/10_Wg-Viii-10/04.Pdf
4. Flores, D., González-Hernández, I., Lozano, R., Vazquez-Nicolas, J. M., & Toral, J. L. H. (2021). Automated Agave Detection And Counting Using A Convolutional Neural Network And Unmanned Aerial Systems. Drones, 5(1), 1–17. Https://Doi.Org/10.3390/Drones5010004

5. Espinoza-Hernández, J., De Jesús López-Canteñs, G., López-Cruz, I. L., & Romantchik-Kriuchkova, E. (2023). Agave Plant Density Using Convolutional Neural Networks On Aerial Imagery. Agrociencia, 57(7), 1344–1370. Https://Doi.Org/10.47163/Agrociencia.V57i7.2970
6. Ammar, A., Koubaa, A., & Benjdira, B. (2021). Deep-Learning-Based Automated Palm Tree Counting And Geolocation In Large Farms From Aerial Geotagged Images. Agronomy, 11(8), 1–24. Https://Doi.Org/10.3390/Agronomy11081458
7. Ponce, J. M., Aquino, A., Sarabia, R., Millan, B., Tejada, D., & Noguera, M. (2020). Automated Identification of Crop Tree Crowns from UAV Multispectral Imagery by Means of Morphological Image Analysis. 12(5), 748; https://doi.org/10.3390/rs12050748

Sensoriamento hiperespectral para avaliação de genótipos de batata-doce (Ipomoea batatas (L.))

Fishua Dango[1*], Darllan Oliveira[1], Geissiane Toledo[1], Souradji Bachirou[1], Edvaldo Nhanombe [1], David Rosalen [1], Politon Guedes[2] and Pablo Vargas[3],

1Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - FCAV, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Brasil. E-mail: f.dango@unesp.br; darllan.oliveira@unesp.br; geissiane.toledo@unesp.br; ib.souradji@unesp.br; e.nhanombe@unesp.br; david.rosalen@unesp.br

2 Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Brasil. E-mail: politon.guedes@unesp.br

3 Faculdade Centro de Raízes e Amidos Tropicais – CERAT, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Brasil. E-mail: pablo.vargas@unesp.br

* Correspondence: f.dango@unesp.br; Tel.: (+55) 16 99430-7246

Resumo: O sensoriamento de imagens desempenha um papel fundamental na agricultura, pois utiliza sensores avançados multiespectrais e hiperespectrais. Os sensores aprimoram e facilitam a obtenção precisa de dados em diversas faixas do espectro, permitindo a fenotipagem de alto rendimento, o monitoramento do estado nutricional e fitossanitário das plantas, além de análises químicas e físicas de baixo custo. O objetivo deste trabalho é a construção de uma biblioteca espectral de genótipos de batata-doce através da imagem hiperespectral de folhas, obtendo-se as respectivas assinaturas espectrais. O ensaio foi montado na UNESP, Câmpus de Jaboticabal, no período de setembro de 2023 a fevereiro de 2024, em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Avaliou-se uma cultivar de batata-doce: Canadense e dois genótipos CERAT35-11 e CERAT31-12. A área útil da parcela correspondeu a oito plantas, sendo avaliadas seis plantas centrais. A colheita foi realizada aos 150 dias após o plantio. As variáveis avaliadas foram: índice de clorofila, formato da folha e o respectivo sensoriamento hiperespectral das folhas com o sensor Pika-L (Resonon, EUA). A cultivar Canadense e o genótipo CERAT31-12 possuem, em sua assinatura espectral, maior índice de clorofila, entre 500 nm e 600 nm no espectro visível. O genótipo CERAT31-11 apresenta menor índice de clorofila dada a refletância de 500 nm a 570 nm.

Palavras-chave: Batata-doce; biblioteca spectral; espectrorradiometria; fenotipagem de alto rendimento.

1. Introdução

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.)) é uma planta originaria da América Central com grande importância social e econômica. Os dados recentes da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) indicam que cerca de 93,519.977.74 milhões de toneladas de batata-doce foram produzidas em todo o mundo em 2023 (Faostat, 2025 - https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL). A batata-doce

apresenta ampla diversidade na composição morfologia e fisiológica, tal como na parte aérea, no hábito de crescimento, no comprimento do entrenó, na pigmentação da antocianina, no entrenó e na brotação inicial, e na pubescência da brotação inicial. As folhas possuem ampla gama de variação da coloração na face superior, no número, no formato e profundidade dos lóbulos, assim como na pigmentação antocianínica na face superior e nas veias da face inferior. A parte subterrânea apresenta raízes com formato, tamanho, diâmetro, cor principal e secundaria de pele, cor principal e secundaria da polpa, com ampla variação.

Características qualitativas requerem mão de obra qualificada e maior tempo para obter os dados, devido às dificuldades de padronização na atribuição subjetiva de notas. Cada avaliador atribui nota às diferentes caraterística em análise; recomenda-se três ou mais avaliadores para obter-se uma nota média (Huamán, 1991). Como alternativa à análise subjetiva realizada por avaliadores, uma biblioteca espectral pode fornecer assinaturas espectrais características dentro do espectro visível e infravermelho próximo, conforme o sensor utilizado, permitindo, dessa forma, analisar amostras orgânicas por meio da espectrorradiometria, obtendo-se resultados mais objetivos, assertivos e em menor tempo; inclusive, minimizando o processo de fenotipagem (Pôças et al., 2024).

Nos últimos anos, os sensores multiespectrais de banda larga convencionais têm sido empregados para estimar a área cultivada e realizar o monitoramento durante o ciclo da cultura. Contudo, esses sensores apresentam limitações em relação à largura da banda espectral e à resolução espectral. Além disso, não possuem a capacidade de mapear os parâmetros bioquímicos ou biofísicos nas culturas. Dessa forma, o sensoriamento remoto hiperespectral mostra um grande potencial e melhorias na classificação de vários tipos de culturas, recuperação de conteúdos biofísicos e bioquímicos, estimativa do estado nutricional, detecção de estresses abióticos e bióticos, condições do solo em comparação com as informações espectrais tradicionais de banda larga. A tecnologia de sensoriamento remoto hiperespectral oferece a oportunidade de mapear a resposta de diferentes tipos de culturas em termos de características morfológicas e fisiológicas em bandas espectrais contínuas (Nigam R et al., 2019) e (Borrmann et al., 2023). A dossel e o índice ou teor de clorofila são indicadores do estado fisiológico da planta, relacionados diretamente com o processo de fotossíntese. Estas características estão diretamente expressas nas assinaturas de refletância constituíndo uma biblioteca espectral.

A biblioteca espectral é uma importante ferramenta para a discriminação de tipologias ou classes de diferentes alvos; destaca-se que esta é de grande praticidade na realização de análises, dada a rapidez na coleta de dados e de ser um processo de amostragem não destrutivo. Em espécies de plantas, a biblioteca espectral pode ser usada para melhorar a compreensão das propriedades bioquímicas, biofísicas e morfológicas , selecionar as características espectrais mais sensíveis e robustas associadas a características únicas de espécies, assim como apoiar a respectiva classificação de plantas e de grupos funcionais, possibilitando a caracterização da variabilidade espectral ao longo do espaço e do tempo, registrando mudanças nos estados fenológicos e nas condições nutricionais das plantas em diferentes situações ambientais (Poças et al., 2024).

Algumas técnicas de aprendizado de máquina em espectrorradiometria podem prever com precisão a firmeza da batata-doce (Nantongo et al., 2023). Ahmed et al., (2024) avaliaram a distribuição espacial de atributos de qualidade, nomeadamente o conteúdo de massa seca, o conteúdo de sólidos solúveis e a firmeza, em três cultivares de batata-doce. No entanto, poucos estudos são realizados sobre a parte aérea, rama de batata-doce, visto que o transporte de fotoassiminados está diretamente relacionada com o rendimento da raiz. A composição da parte aérea da batata-doce, como ramas e folhas, tem um impacto direto no rendimento das raízes. As folhas e ramas desempenham um papel crucial no processo de fotossíntese, produzindo fotoassimilados (compostos orgânicos gerados pela fotossíntese) que são, então, transportados para as raízes. Este processo ocorre principalmente através do floema, que é o tecido responsável pelo transporte de nutrientes na planta. A parte aérea bem desenvolvida com folhas saudáveis pode maximizar a capacidade fotossintética, aumentando a produção de carboidratos e outros nutrientes essenciais que são cumulados nas raízes. O objetivo do estudo foi avaliar genótipos de batata-doce, em conjunto com o Sensoriamento Remoto Hiperespectral de folhas, e as respectivas assinaturas espectrais.

2. Material e Métodos

O ensaio foi montado na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV, Câmpus de Jaboticabal-SP, no setor de Olericultura e Plantas Aromático-Medicinais, no período de setembro de 2023 a fevereiro de 2024. O experimento foi instalado à latitude de 22°46'20"S, longitude de 48°34'27"W e elevação 766,52m. O solo da área é Latossolo Vermelho Escuro Eutrófico de textura argilosa moderada (Andrioli et al., 1999).

Foram avaliadas uma cultivar Canadense (cor da pele roxa, cor da polpa branca, formato da raiz fusiforme), os genótipos CERAT35-11 (cor da pele amarela, cor da polpa laranja intensa, formato próximo do fusiforme) e CERAT31-12 (cor da pele amarela, cor da polpa laranja intermédia com pigmentos roxos, formato da raiz fusiforme) (Figura 2).

O experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, sendo compostos pela área útil da parcela correspondente a oito plantas, sendo avaliadas seis plantas centrais, a colheita realizada aos 150 dias depois do plantio.

As variáveis avaliadas foram: índice de clorofila e o formato da folha e o respectivo sensoriamento hiperespectral das folhas com o sensor Pika-L (Resonon, EUA). Os dados foram analisados pelo software Minitabe.

A Pika L é uma câmera hiperespectral leve e compacta para a faixa espectral de Visível e Infravermelho Próximo (VNIR) 400 – 1000 nm, tornando-a adequada para aplicações de sensoriamento remoto aerotransportado ou transportado. O sensor Pika L pode ser usado em sistemas hiperespectrais aéreos, laboratoriais e externos, bem como autônomos ou integrados ao sistema de orientação e programação. A imagem hiperespectral apresenta faixa espectral entre 400 a 1000 nm, 900 pixels espaciais por linha, 281 canais espectrais por linha, resolução espectral de cerca de 2,7 nm (Figura 1).

Figura 1: Câmera Pink L fixa na barra superior, após a leitura envia os dados de refletância para o computador.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 2: Amostras coletadas para dados de refletância sobre as folhas da cultivar canadense (a) e dos genótipos (b) CERAT31-12 e CERAT35-11.

3. Resultados

Análise de dados espectrais

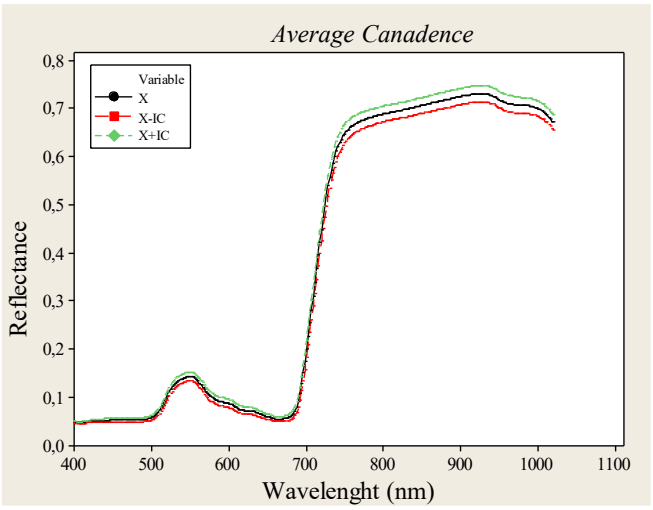
Uma variação nas características morfológicas dos genótipos e cultivares de batata-doce foram identificadas nas amostras selecionadas para a coleta de dados. Foram coletadas um total de 96 amostras de folhas para análise, sendo que, após um processo de seleção criteriosa, 64 dessas amostras foram escolhidas para a coleta de dados de refletância espectral. Essas amostras selecionadas foram utilizadas para realizar medições precisas, a fim de se obter informações detalhadas sobre as propriedades espectrais das folhas, essenciais para o objetivo do estudo (Tabela 1).

Tabela 1: Caracteres morfológicos da cultivar Canadense e dos genótipos CERAT35-11 e CERAT31-12.

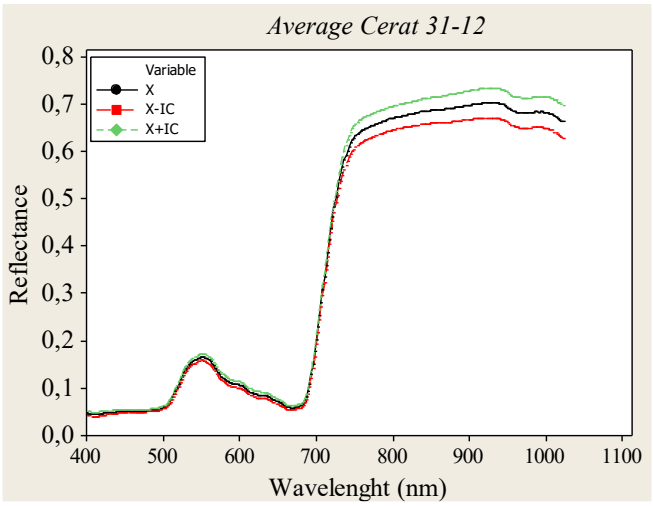
Ordem	Cultivar/Genótipo	Cor da pele	Cor da polpa	Cor da rama	Formato da folha
1	Canadense	roxa	branco	verde	triangular
2	CERAT35-11	amarela	laranja intenso	verde	lobado
3	CERAT31-12	amarela	laranja	verde	hastato

A Figura 3 apresenta as curvas espectrais médias das cultivar canadense e dos genótipos CERAT31-12 e CERAT35-11. As curvas de refletância espectral das folhas são caracterizadas por valores de 400 nm a 700 nm no espectro visível e altos valores no NIR. Em relação à cultivar Canadense e ao genótipo CERAT31-12, estes

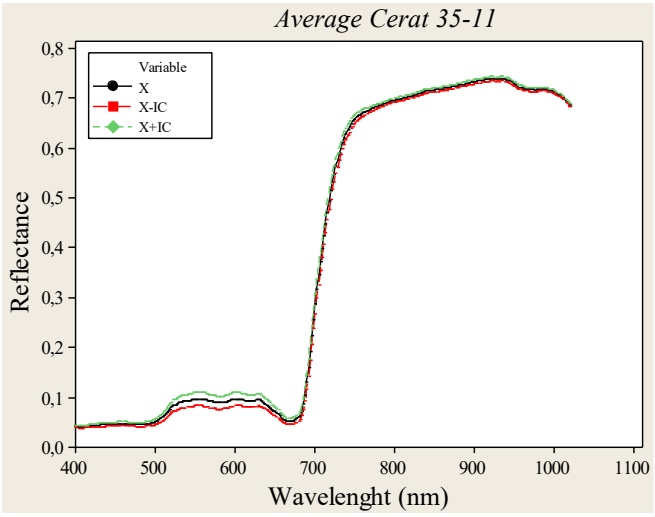
apresentam espectros na faixa de comprimento de onda no visível, entre 500 nm e 600nm e o genótipo CERAT35-11 encontra-se na faixa dos 500 a 570nm.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Curvas espectrais médias (X), intervalo de confiança menor (X-IC) e intervalo de confiança maior (X+IC) cobrindo a faixa de 400 a 1100 nm, coletadas sobre as folhas na parte superior de batata-doce: (a) cultivar canadense, (b) CERAT31-12 e CERAT35-11.

4. Discussão

A cultivar Canadense apresenta formato da folha triangular e o genótipo CERAT31-12 lobado, ambos os genótipos na assinatura espectral apresentam maior índice de clorofila, entre 500 nm e 600 nm no espectro visível, confirmando assim a cor verde primária das folhas de ambos os genótipos. O genótipo CERAT35-11 tem formato da folha hastato (trilobular em forma de lança com os lobos basais mais divergentes), apresentando menor índice de clorofila dada a refletância de 500 nm a 570 nm, comparativamente aos outros genótipos. A antocianinas representam o segundo maior grupo de pigmentos de origem vegetal, depois da clorofila. Este resultado está diretamente correlacionado com a presença de pigmentação antocianinica nas folhas do genótipo CERAT35-11.

5. Conclusão

A biblioteca espectral do genótipo CERAT31-12 e da cultivar Canadense apresenta maior índice de clorofila, em relação ao genótipo CERAT35-11, e índice elevado de antocianina. Os resultados obtidos contribuem para a construção de uma biblioteca espectral de genótipos de batata-doce, contribuindo, dessa forma, para a Fenotipagem de Alto Rendimento desta cultura.

Contribuições dos autores: Conceitualização, F.D., D.R. e P.V.; metodologia, F.D., D.R., D.O. G.T.; software, S.B.; validação, F.D., S.B e E.N.; análise formal, F.D.; investigação, F.D e P.G.; recursos, D.R. e P.V.; curadoria de dados, D.R. e S.B; redação — preparação do rascunho original, F.D.; redação — revisão e edição, F.D.; visualização, D.R.; supervisão, P.V.; administração do projeto, P.V.; aquisição de financiamento, P.V e D.R. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo apoio financeiro das agências Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2021/03537-1, (Cooperation Agreements / IBM Brasil– PITE) e ao CERAT (Centro de Raízes e Amidos Tropicais da Unesp).

Declaração de disponibilidade de dados: Os dados do presente estudo podem ser fornecidos através do email: f.dango@unesp.

Agradecimentos: Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Processo 2021/06029-7), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo 316315/2023-0) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte financeiro e pela concessão de bolsas. Ao CERAT (Centro de Raízes e Amidos Tropicais da Unesp), Núcleo de Geomática e Agricultura de Precisão (NGAP) e ao Setor de olericultura de plantas ornamentais.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. Andrioli I, Centrurion JF (1999) Levantamento detalhado dos solos da faculdade de ciências agrarias e veterinária de Jaboticabal. Congresso de ciência do solo. Anais, Brasília, Sociedade Brasileira de ciência do solo, 32p.
2. Ahmed, T.; Wijewardane, N. K.; Lu, Y.; Jones, D. S.; Kudenov, M.; Williams, C.; Villordon R.; & Kamruzzaman, M. (2024) Advancing sweetpotato quality assessment with hyperspectral imaging and explainable artificial intelligence. Computers and Electronics in Agriculture, v. 220, p. 108855.
3. Basso, B.; Cammarano, D.; & De Vita, P. (2004) Remotely sensed vegetation indices: Theory and applications for crop management. Rivista Italiana di Agrometeorologia, v. 1, n. 5, p. 36-53.
4. Borrmann, P.; Brandt, P.; Gerighausen, H. (2023) MISPEL: A Multi-Crop Spectral Library for Statistical Crop Trait Retrieval and Agricultural Monitoring. Remote Sens, 15, 3664.
5. Cardoso-Fernandes, J.; Santos, D.; Rodrigues de Almeida, C.; Lima, A.; Teodoro, A.C. (2023) Spectral Library of European Pegmatites, Pegmatite Minerals and Pegmatite Host-Rocks—The GREENPEG Project Database. Earth Syst. Sci., 15, 3111–3129.
6. Da Silva, E. M.; de Souza, D. T. M.; & Rocha, W. D. J. F. (2022) Spectral library as a support for the characterization of geodiversity in the Campinas sub-basin (BA, Brazil). Geosciencess, Brasil, v. 41, n. 4, p. 991-999.
7. Lebot, V.; Ndiaye, A.; Malapa, R. (2011). Phenotypic characterization of sweet potato [Ipomoea batatas (L.) Lam.] genotypes in relation to prediction of chemical quality constituents by NIRS equations. Plant Breeding. **2011**, volume 130, n. 4, p. 457-463.
8. Nantongo, J.S.; Serunkuma, E.; Burgos, G.; Nakitto, M.; Davrieux, F.; Ssali, R. (2023) Machine Learning methods in Near Infrared spectroscopy for predicting sensory traits in sweetpotatoes. Available at SSRN, 4586255. https://doi.org/10.2139/ ssrn.4586255.
9. Nigam R; Tripathy R.; Dutta S.; Bhagia N.; Nagori R.; Chandrasekar K.; Kot R.; Bhattacharya B K.; & Ustin S.; Crop type discrimination and health assessment using hyperspectral imaging. Current Science, v. 116, n. 7, 2019, p. 1108-1123.
10. Pôças, I.; Almeida, C. R. D.; Arenas-Castro, S.; Campos, J. C.; Garcia, N.; Alírio, J.; & Teodoro, A. C. Spectral Library of Plant Species from Montesinho Natural Park in Portugal. 2024; v. 9, n. 5, p. 65, 2024.
11. He, H. J.; Wang, Y.; Wang, Y.; Al-Maqtari, Q. A.; Liu, H.; Zhang, M.; & Ou, X. Towards rapidly quantifying and visualizing starch content of sweet potato [Ipomoea batatas (L.) Lam] based on NIR spectral and image data fusion. International Journal of Biological Macromolecules, Daily data. 2023; volume. 242, p. 124748.
12. Herbei, M. V.; Sala, F.; & Boldea, M. Relation of normalized difference vegetation index with some spectral bands of satellite images. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2015.
13. Z. Húaman. Descriptors for sweetpotato. International Board for plant Genetic Resources. Rome, Italy, 1991.
14. Zhao, D.; Huang, L.; Li, J.; & Qi, J. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, v. 62, n. 1, p. 25-33.
15. Faostat, 2025 - https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Development of low-cost sensors, machine learning and collaborative IoT ecosystems for the precise irrigation of orchards and vineyards

Jucilene Siqueira [1], Livia Pian [1], Raul Estevinha [1], Cátia Pinto [1] and Teresa A. Paço [2,*]

[1] Associação SFCOLAB – Laboratório Colaborativo para Inovação Digital na Agricultura, Rua Cândido dos Reis 1, 2560-312 Torres Vedras, Portugal; jucilene.siqueira@sfcolab.org

[2] LEAF—Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Center, Laboratório Associado TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, tapaco@isa.ulisboa.pt

* Correspondence: tapaco@isa.ulisboa.pt

Abstract: Efficient water use in agriculture requires precise irrigation management, but high costs and technical complexity often limit farmers' access to advanced solutions. This study introduces SOFIS, a low-cost, modular, and customizable digital tool for real-time irrigation scheduling. SOFIS integrates IoT and machine learning to monitor soil, plant, and atmospheric conditions, enabling quick adaptation to environmental changes. Its hardware includes a network of sensors measuring soil moisture, evaporation, salinity, temperatura and plant sap flow, as well as air temperature and humidity within the canopy. An innovative automated weighing device assesses soil evaporation, while Peltier cells estimate latent heat flux. Data is transmitted via GSM, Wi-Fi, or LORA to a web platform, where SOFIS software applies Agriculture 4.0 principles. Using artificial intelligence and machine learning, it processes and analyses data in real time, providing actionable insights for adaptive irrigation management. SOFIS aims to enhance agricultural digitization by offering an accessible and efficient solution for optimizing water use in orchards and vineyards.

Keywords: Precision Irrigation; Low-cost system; Agriculture 4.0

1. Introduction

Efficient water use in agriculture is a critical challenge in modern society. Water scarcity is increasingly affecting not only arid and drought-prone regions but also areas with abundant rainfall. To address this issue, numerous studies propose solutions to optimize water use, focusing on improving water quality and reducing consumption while minimizing environmental impacts and maintaining agricultural productivity[1].

Irrigation systems can be optimized through the evaluation of biophysical parameters related to water, soil and heat transfer within the vadose zone of

irrigated crops, considering interactions between plants, soil, and the atmosphere [2], [3]. In this context, one of the main challenges in irrigation management is the accurate quantification of crop water requirements and soil characteristics. The development of methodologies that integrate the use of digital technology and support decision making for better irrigation management is essential. Researchers are tasked with developing technological alternatives that ensure efficient water use while being adaptable to rural environments, considering economic, social, and technical limitations[4].

The adoption of digital tools—such as remote and proximal sensing, autonomous equipment, and artificial intelligence (AI)—is revolutionizing precision agriculture, enhancing both profitability and sustainability in the agricultural sector. However, many of these innovations remain inaccessible to all farmers due to high costs and insufficient information and support[5]. Despite technological advancements, the increasing sophistication of measurement devices has, in some cases, led to reduced accuracy due to inadequate user training. Several factors contribute to the failure of adoption of technology in agriculture, including economic constraints, maintenance challenges, lack of training, and weak coordination among stakeholders.

A promising solution is the Smart-Orchard Ferti-Irrigation System (SOFIS) developed by SFCOLAB (Collaborative Laboratory for Digital Innovation in Agriculture). The system is a modular, low-cost sensor-based system designed for the intelligent management of ferti-irrigation. It enables real-time data integration between digital farm management platforms and farmers[6]. The system employs customized sensors, tailored to the specific needs of various crops, including horticulture, vineyards, olives, avocados, raspberries, and cherries. SOFIS employs IoT technologies to assess data, integrating a network of sensors designed to estimate plant and soil water dynamics in real-time. Soil sensors measure water content, salinity, and temperature, while plant sensors monitor sap flow. Atmospheric sensors track air temperature and relative humidity within the canopy. Additionally, an innovative automated weighing device enables continuous assessment of soil water evaporation, supported by a methodology utilizing Peltier cells to estimate latent heat flux in the soil[7], [8].

Data collected by SOFIS can be transmitted via LORA, WIFI or GSM connectivity to a web-based platform, where AI-driven software processes, analyses, and systematises real-time data. Using multiple algorithms, founded in biophysical principles (SOFIS data), the collected data is modelled and validated by AI for pattern recognition and the development of models suited to specific crops and edaphoclimatic conditions.

SOFIS generates information to better decision-making to enhance agricultural water management, contributing to the sustainable management of agricultural water resources. It is a cost-effective tool to monitor microclimatic, meteorological, soil, and plant conditions, tailored to the needs of each producer and farm. Its affordability and technical support ensure accessible and practical use of data for optimizing irrigation, fertigation, soil fertility, and crop protection.

This work presents a case study from the application of SOFIS to water balance estimation in an olive orchard, from a collaborative effort between SFCOLAB and ISA (Instituto Superior de Agronomia)[9]. It aims to demonstrate the potential of new low-cost IoT-based technologies in optimizing irrigation practices in olive groves by estimating soil water storage and plant transpiration using the customized sap flow sensor (Sap Flow), a soil weighing device (mLy), and a soil heat flux sensor (Pelt) focusing on its performance when compared with commercial low cost sensors, namely, soil moisture sensors (Teta), and air temperature and humidity sensors (VPD).

2. Materials and Methods

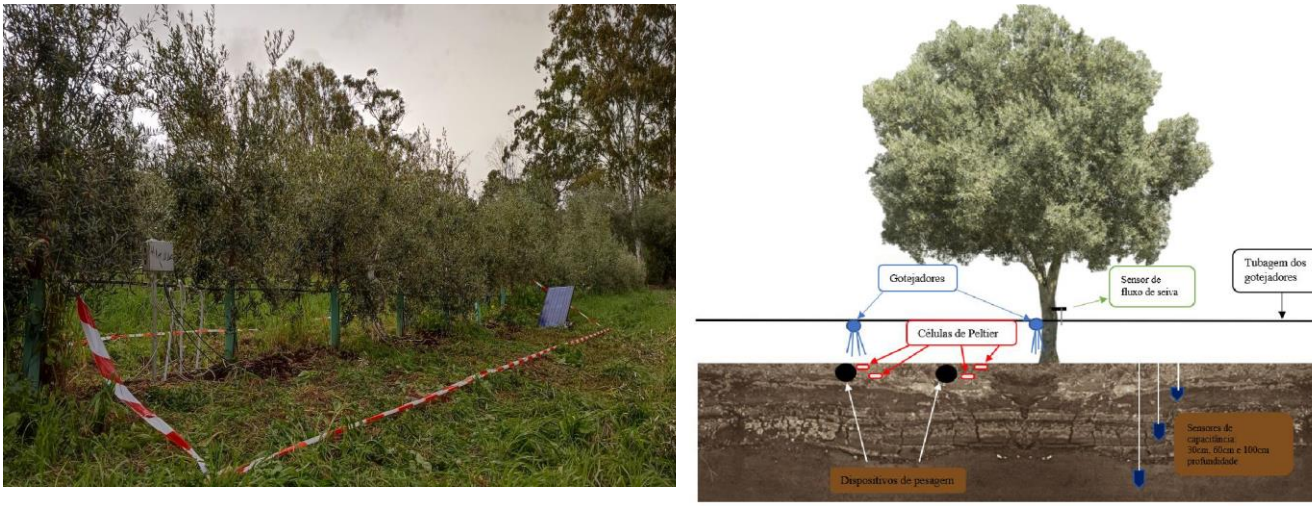
The olive orchard selected for this study is located in ISA (Instituto Superior de Agronomia), Lisbon, Portugal. The orchard was planted in 2019, with a super intensive plantation distance (1.5 m x 5.5 m), and a drip irrigation system, corresponding to the I-21 clones of the Arbequina variety (Figure 1a). The experimental work started in 23 March of 2022, and continues until the present day.

For this study, SOFIS was customized in two domains: hardware and software. The hardware applied comprises a combination of three customised sensors tailored in SFCOLAB: 1. sap flow sensor (Sap); 2. soil evaporation sensor (mLy); 3. soil heat flux sensor (Pelt). And two commercially available low-cost sensors: 1. soil moisture sensors (Teta); 2. air temperature and humidity sensor (calculation of vapor pressure deficit, VPD). All sensors were assembled and calibrated in the SFCOLAB laboratory.

For each of the three olive trees selected for sensor installation, one customized sap flow density sensor (Sap Flow, cm/h), three soil weighing device to soil evaporation estimation (mLy1, mLy2, mLy3, g), and two Peltier cells for soil heat flux estimation (Pelt2 and Pelt5, W/m^2) were used. The mLy sensors are installed at a depth of 5 cm, respectively mLy1 immediately below the dripper, mLy2 at 25 cm from the dripper, in the irrigation line between the dripper and the olive tree and mLy3 at 40 cm from the dripper, between the lines. Pelt2 sensor is installed at a depth of 2 cm and Pelt5 installed at a depth of 5 cm, both at 25 cm from the dripper. The commercially low-cost sensors included are three soil moisture sensors (Teta60, Teta100 and Teta30,

m^3/m^3) at the depth 30, 60, 100 cm, and one air temperature and humidity sensor installed into the canopy to compute vapour pressure deficit (VPD, kPa). The sensor arrangement is illustrated in Figure 1b.

For the three replications are installed, each replication comprises two adjacent non-sampled olive trees of identical vigour. Each replication corresponds to one SOFIS system [9].



(a) **(b)**

Figure 1: Work Overview: (a) Experimental trial installed in ISA's olive grove; (b) Scheme of the spatial arrangement of the SOFIS constituent sensors. Font: [9].

The SOFIS hardware also integrates an energy system (commercial low-cost solar panel, a PWM (Pulse Width Modulation) controller, and an affordable battery) and a communication system (low-cost microcontrollers and an Arduino MKR WAN 1310 LoRaWan communication device). The communication system was programmed to communicate with The Things Network, which then transmits the data to ThingSpeak™.

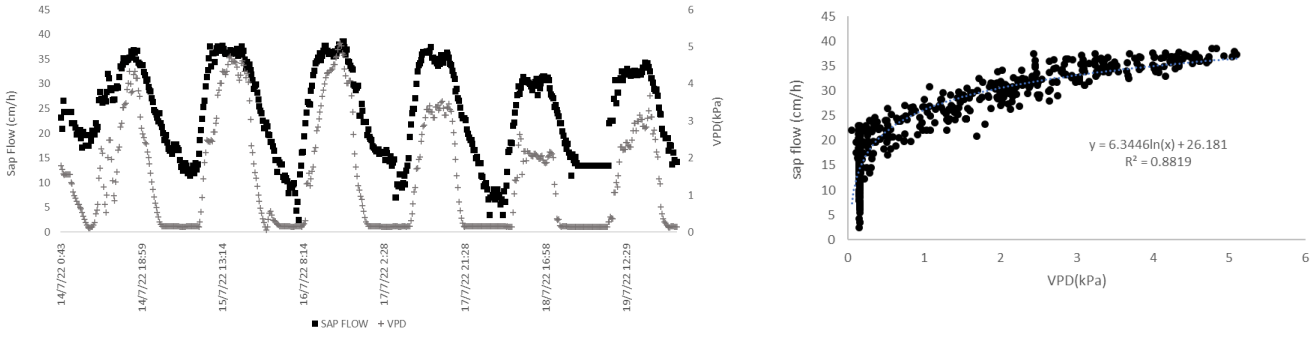
The software encompasses both data acquisition and data processing. Regarding data acquisition, the location of the experiment is covered by LoRaWAN® [10], making it an optimal network for monitoring the sensors installed in the olive grove.

Each of the three systems is connected to a processing and communication unit (Arduino MKR WAN 1310), which transmits data via the LoRa® network to The Things Stack server. This server receives the data and forwards it to the ThingSpeak™ platform [11] through The Things Network (TTN), where it is processed using a webhook, enabling real-time analysis and online data processing.

Regarding data processing, the ThingSpeak™ platform facilitates real-time monitoring of the collected data while also allowing data storage for future export. For that specific study, the exported data is processed in Microsoft Excel, where it is structured into relational tables and analysed to evaluate proposals.

3. Results

This section provides a comparative analysis of customised sensors and commercial low-cost sensors, aiming to assess their ability to provide real-time simple information. Figure 2 shows the transpiration values obtained with sensor Sap Flow (cm/h) in comparison with VPD (kPa) estimated from data collected from day 195 to day 200 (2022). As expected, the sap flow circadian curve is related to VPD, as it is presumed (Figure 2(a)). Figure 2 (b) shows a logarithm relationship (R^2 = 0.86) between SAP Flow and the VPD sensor. It is observed that as the VPD increases, transpiration reaches its limit, being constant in relation to the increase in VPD. It is well known the relation of stomatal conductance with vapor pressure deficit and the relation with evapotranspiration in olive trees[12], which can explain the strong relation of the variables.



(a) **(b)**

Figure 2: Estimation of sap flow density, SAP FLOW (cm h^{-1}) compared with vapour pressure deficit data, VPD (kPa): (a) sap flow circadian curve is related to VPD; (b) logarithmic relationship between SAP Flow and the VPD sensor.

In Figure 3, Sap Flow and mLy3 sensors exhibit opposing circadian patterns. This is expected, as the mLy3 sensor measures the weight of the soil localized between rows. When transpiration is high, soil weight decreases due to the evaporation on the soil surface occurring at a parallel pace to transpiration, following ambient conditions and the available energy for the evaporation processes. Conversely, when transpiration is reduced, soil weight increases as evaporation declines, resulting in a higher soil weight. It can be concluded that the transpiration and soil evaporation results obtained by sensors are related, which might be further explored for automating data analysis.

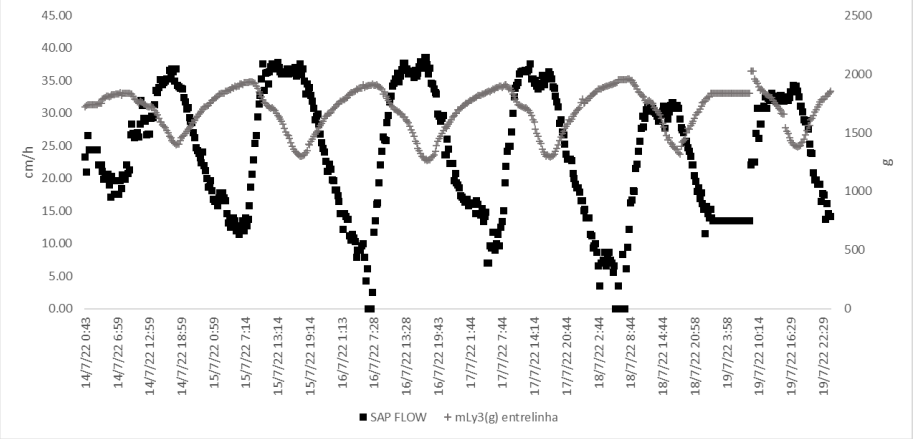


Figure 3: Circadian patterns of Sap Flow and mLy sensors.

In Figure 4, the Sap Flow and Pelt2 sensor exhibit a similar circadian pattern. This is explained by transpiration increases when soil heat flux to the ground also increases due to higher solar radiation, as evidenced by the measurement of heat flux into the soil. However, around solar noon, declined Pelt2 values can be observed when Sap Flow shows higher values. This is a result of shading caused by the olive tree canopy over the Pelt2 sensor. It corroborates the relevance of these sensors in estimating values related with solar radiation, highlighting his precision and variability due to environmental changes.

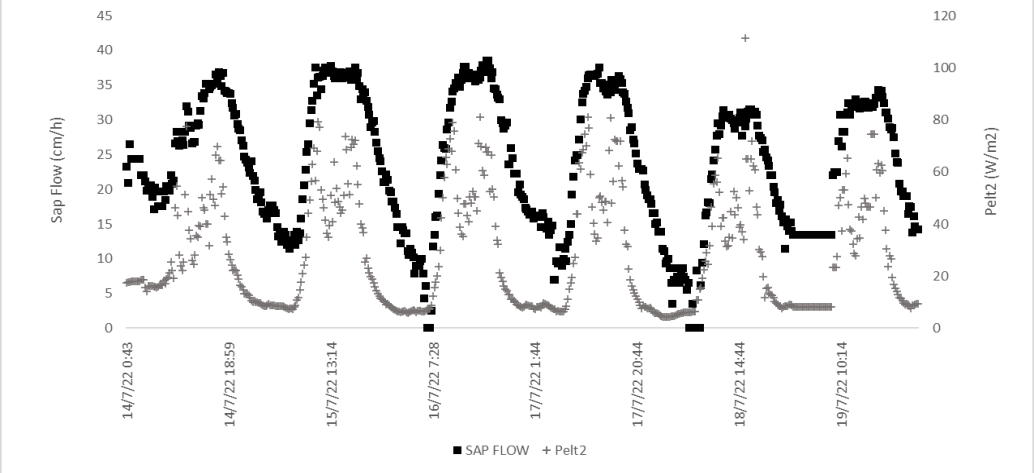


Figure 4: Circadian patterns of Sap Flow and Pelt2 sensors.

The soil heat flux estimated from the near soil surface location (Pelt2) and at 5 cm depth (Pelt5) were related between days 159 and 162 (2022) (Figure 5). Pelt2 and Pelt5 data showed a significant relationship (R^2=0.84). As expected, the values of Pelt2 were 23 % higher than Pelt5, i.e., 5 cm layer of soil has been storing 23% of the total solar radiation received. It means that the data from the pair of Pelts sensors are well correlated, and this relationship can further be used for soil heat storage estimates.

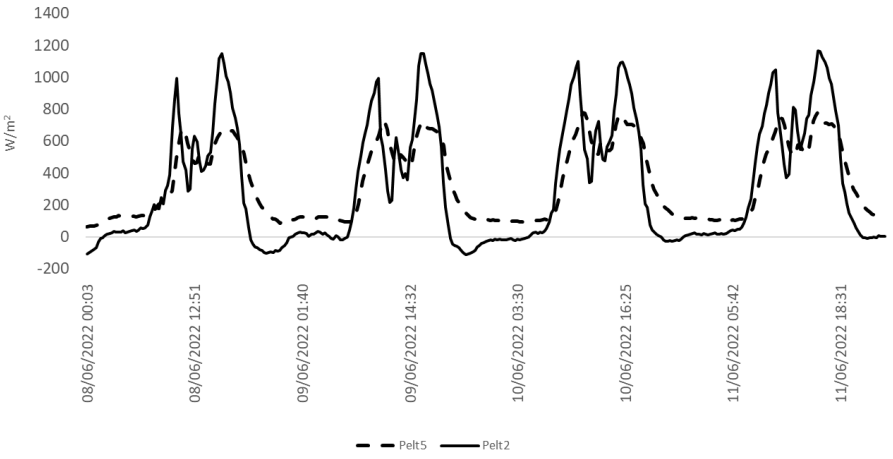


Figure 5: Soil heat flux (W m^{-2}) estimated from the near soil surface (Pelt2) and at 5 cm depth (Pelt5).

In Figure 6, soil moisture data were collected between June 8 and June 11, 2022, by the sensors installed on SOFIS 3 and compared to those obtained by the mLy2 to assess their quality. It can be observed that after each irrigation event, sensors Teta1, Teta2, and Teta3 responded, displaying values within their measurement range (0.30–0.45 m^3 m^{-3}) for clay soils. The mLy2 sensor exhibited a response consistent with the Teta sensors, with weight normalized to the measurement range of 0.30–0.45 m^3/m^3, increasing in line with higher soil moisture levels after irrigation

events. Additionally, after each irrigation event, the recorded soil water content was approximately 0.45 m^3 m^{-3}, corresponding to the field capacity of this soil type, and around 0.30 m^3 m^{-3}, representing the percentage relative to the wilting point coefficient.

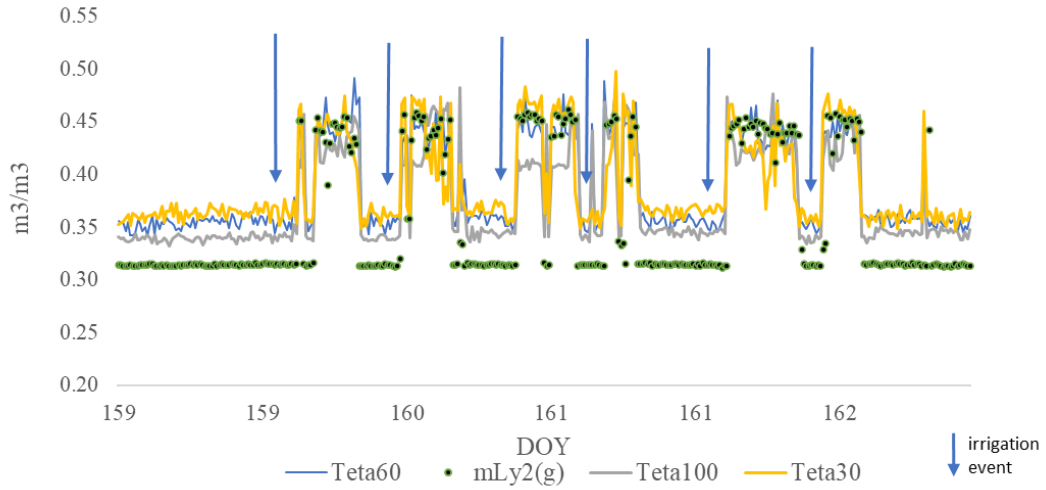


Figure 6: Circadian patterns of Tetas 1, 2 and 3 (m^3/m^3) and mLy2 (m^3/m^3) sensors.

4. Discussion

The information collected by the SOFIS system, integrating customised sensors tailored in SFCOLAB (Sap Flow, mLy, Pelt) and commercial low-cost sensors (VPD, Teta1, Teta2, Teta3) allowed the evaluation of the customized sensors in respect to their sensitivity and automated functioning. The several intercomparisons performed demonstrated that there are high correlations between the variables analyzed, thus, allowing to improve the information acquired by the adjustment of values when the data are processed in an intelligent mathematical model.

The customized sap flow sensors were evaluated, and the demonstrated relationship between VPD and the sap flow density denoted the good qualitative functioning of the Sap Flow sensor. Through a deeper study, it may be possible to estimate transpiration in routine operations for olive trees and other woody species, which will allow to estimate the actual amount of water that the plant consumes, and to practice a more efficient irrigation scheduling. Given that traditional methods for measuring sap flow are still far from being low-cost, and far from being durable enough for use by the common consumer, in this case farmers, it is believed that the solution presented in this work has potential, through new future developments.

The mLy developed in this workframe met the objective of estimating soil evaporation. It demonstrated that mLy can, in conjunction with other sensors, be used to estimate soil water balance and provide a tool to efficiently indicate the

hourly depletion of water. However, it should be noted that the mLy devices have not been evaluated over long time periods and thus these results are only strictly applicable for short-term (days to weeks) studies. The challenge consists of keeping the mLy without local perturbations for long-term.

The Pelts showed to be useful to fine-tune the soil evaporation and the sap flow estimates, given that the variables soil heat storage, soil water content and transpiration are intercorrelated. Thus, transpiration and soil water estimates can be checked with a low-cost and straightforward soil heat flux transductor. The sensors for estimating soil heat storage were studied in this work with the objective of verifying whether they can be used as a complement to mLy in the estimation of soil evaporation. The behaviour of soil heat storage relative to that of mLy suggests that this goal can be met by further studies. The good functioning of the solution for estimating the heat flux of the soil shows that these sensors should not be limited to the objective determined in this work, but that they can also be used for other purposes (e.g., soil heat storage related to soil microbiological studies).

5. Conclusion

In conclusion, the SOFIS system studied in this work aggregates information such as: estimates of water content and evaporation in the soil, dynamics of heat flow in the soil, tree sap flow and vapor pressure deficit inside the canopy. This system could provide to the farmer a practical and low-cost solution for the efficient scheduling of irrigation in olive orchards, supported by a data acquisition and transmission system using the LoRaWAN® protocol and low-cost sensors. The proposed system also presents excellent potential for implementation in scientific research applications, in the field context, and can empower researchers, technicians and farmers with flexible, inexpensive tools for expanding data-collection, automation, and control capacities.

Author Contributions: Conceptualization, J.S. and T.A.P; methodology, J.S. and L.P; software, J.S.; validation, L.P., and R.E.; formal analysis, T.A.P; investigation, R.E.; resources, C.P.; data curation, J.S.; writing—original draft preparation, J.S. , L.P; writing—review and editing, T.A.P.; supervision, T.A.P and C.P; project administration, T.A.P; funding acquisition, T.A.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data supporting reported results can be found in references [4], [9]

Acknowledgments: Trabalho financiado por fundos nacionais através de FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., projecto UIDB/04129/2020, LEAF-Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food, Research Unit; LEAF/irrig.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. L. Santos Pereira, I. Cordery, and I. Iacovides, "Water Conservation and Saving Measures and Practices," in Coping with Water Scarcity, Dordrecht: Springer Netherlands, 2009, pp. 243–328. doi: 10.1007/978-1-4020-9579-5_10.
2. R. G. Allen and L. S. Pereira, "Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height," Irrig Sci, vol. 28, no. 1, pp. 17–34, Nov. 2009, doi: 10.1007/s00271-009-0182-z.
3. R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 56. Roma, 1998.
4. J. Siqueira, "Sistema de Controlo Inferencial com Dispositivos Sensoriais Direcionados para o Uso Eficiente da Água na Agricultura," Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2019.
5. J. De Medeiros Siqueira, J. M. da Silva, and T. A. do Paco, "Smart orchard irrigation system," in 2015 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), IEEE, Nov. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/DCIS.2015.7388606.
6. Monitorização Proximal SOFIS, "SFCOLAB. Monitorização. 2024. Disponível em: <https://www.sfcolab.org/en/monitorizacao>. Acesso em: 23 mar. 2025."
7. J. M. Siqueira, T. A. Paço, J. Machado da Silva, and J. C. Silvestre, "Biot-Granier Sensor: A Novel Strategy to Measuring Sap Flow in Trees," Sensors, vol. 20, no. 12, p. 3538, Jun. 2020, doi: 10.3390/s20123538.
8. L. Pian, J. Silvestre, J. Siqueira, and C. Pinto, "SOFIS, uma solução tecnológica à medida para a gestão sustentável dos sistemas de produção agrícolas.," in Conferência Ibérica, 2021.
9. R. Estevinha, "Condução da rega em olival: Utilização de sensores de baixo custo para estimativa do armazenamento de água no solo," Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2022.
10. LoRaWAN Alliance, "LoRaWAN Alliance." Accessed: Mar. 24, 2025. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/about-lorawan/
11. MATLAB, "MathWorks. ThingSpeak Documentation." Accessed: Mar. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/thingspeak/
12. C. M. Rodriguez-Dominguez, V. Hernandez-Santana, T. N. Buckley, J. E. Fernández, and A. Diaz-Espejo, "Sensitivity of olive leaf turgor to air vapour pressure deficit correlates with diurnal maximum stomatal conductance," Agric For Meteorol, vol. 272–273, pp. 156–165, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.agrformet.2019.04.006.

A espectroscopia de campo, uma ferramenta de base para a sanidade vegetal. O caso do míldio em Vitis vinifera Loureiro

Fernando Portela [1,2], Luís Pádua [1,5], Joaquim J. Sousa [4] e Claudio A. Paredes [2,6*]

[1] CITAB- Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;

[2] proMetheus - Unidade de Investigação em Materiais, Energia e Ambiente para a Sustentabilidade, Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal;

[3] Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal;

[4] Centro de Robótica na Indústria e Sistemas Inteligentes (CRIIS), INESC Tecnologia e Ciência (INESC-TEC), 4200-465 Porto, Portugal;

[5] Instituto para a Inovação, Capacitação e Sustentabilidade da Produção Agroalimentar, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal;

[6] CISAS — Centro de Investigação em Sistemas Alimentares e Sustentabilidade, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo.

Resumo: Este estudo avaliou a aplicabilidade da espectroscopia de campo para deteção do míldio em *Vitis vinifera* cv. Loureiro, numa vinha na região dos Vinhos Verdes e sub-região do Lima, em Portugal, sendo esta uma região muito afetada por doenças fúngicas devido às condições climáticas. Através de um espetro-radiómetro portátil, foram recolhidos dados espectrais de folhas infetadas com míldio (*Plasmopara vitícola*) e não infetadas, diretamente em campo, permitindo preservar o seu estado fisiológico e analisar a evolução da doença. O processamento dos dados recorreu a um modelo de Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA), com validação cruzada e avaliação por métricas como precisão, recall, F1-score e AUC-ROC. Os resultados revelaram diferenças consistentes na refletância, sobretudo nas regiões do visível, rededge e infravermelho próximo, com a faixa dos 699–718 nm a destacar-se como altamente discriminativa. O modelo obteve uma precisão global de 87,7%, demonstrando elevada capacidade de separação entre classes, embora com alguma limitação na identificação de infeções iniciais. A análise espectral permitiu identificar alterações fisiológicas nas folhas infetadas, como perda de clorofila e desorganização dos tecidos. Conclui-se que a espectroscopia de campo, aliada a métodos estatísticos robustos, é uma ferramenta promissora para a monitorização da sanidade vegetal, permitindo intervenções mais eficientes na proteção da vinha e promovendo uma gestão agrícola mais sustentável.

Palavras-Chave: Viticultura de precisão; Deteção de Proximidade; Classificação de doenças

1. Introdução

O míldio (*Plasmopara vitícola*), é uma das doenças com maior impacto na viticultura, afetando a planta em diferentes fases do seu desenvolvimento vegetativo [1]. O impacto económico e ambiental da doença, tem trazido desafios na sua identificação precoce numa lógica de antecipação do seu controlo, com o propósito da diminuição dos recorrentes tratamentos fitossanitários e consequente aplicação de produtos químicos. Neste caminho, diversos métodos são usados para a sua deteção, sendo o mais comum a observação visual dos sintomas nas folhas, nos pâmpanos e nos frutos [2]. Embora esta técnica de inspeção visual seja o método mais comum, ela pode se tornar demorada, pois requer uma inspeção contínua por técnicos especialistas, podendo não ser confiável, pois depende de uma opinião subjetiva. Os testes laboratoriais, por outro lado, dependem de alguns parâmetros objetivos e mensuráveis, são caros e muitas vezes carecem de rapidez no caso de deteção precoce de doenças de plantas, para além do uso de químicos para a sua quantificação.

Os avanços tecnológicos recentes e a tendência para uma agricultura mais digital e de precisão, resultaram em necessidades de observação, mais rápidas, confiáveis e contínuas, em condições de campo [3–6]. Assim, as técnicas de espectroscopia de contacto de gama espectral larga, como espectroscopia visível e infravermelha têm surgido como uma boa alternativa à análise de diversas propriedades químicas, físicas e biológicas das culturas agrícolas [7], possibilitando a monitorização de doenças em tempo real e em larga escala [8,9].

Além de ser considerada uma técnica rápida, simples e econômica, por não necessitar de processamento de amostras, também é considerada ecologicamente viável por não necessitar do uso de produtos químicos para a sua determinação. Da mesma forma, a opção da portabilidade do sensor, evita a colheita, o transporte e a consequente destruição das amostras, estendendo a capacidade de análise para um maior número de amostras e permitindo o acesso a parâmetros que só podem ser estimados in situ. [10]. Os espetro-radiómetros portáteis, têm sido aplicados em diversos estudos para prever, apoiar ou determinar parâmetros e indicadores de vários níveis, desde a qualidade de produtos agrícolas como damasco [11], morango [12], nectarina [13] e maçã [14], stress hídrico das culturas [15–17], sanidade vegetal da planta [18] e parâmetros físico-quimicos do solo [19] entre outros.

Este trabalho pretende avaliar a utilidade do uso da espectroscopia do visível, infra-vermelho próximo e infravermelho de onda curta, para avaliar a deteção da presença do míldio (*Plasmopara vitícola*), na folha da videira numa parcela de vinha da região dos vinhos verdes. Esta avaliação foi realizada com o uso de um espetro-

radiómetros hiper-espectral de contacto, com medições multi-temporais ao longo do ciclo vegetativo da videira. Os dados foram depois analisados com base em Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA).

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo e desenho experimental

O delineamento experimental decorreu ao longo do ciclo de crescimento da vinha no ano de 2023, numa parcela de 2,2 hectares plantada com a casta *Vitis vinifera* cv. Loureiro. Esta vinha localiza-se na região demarcada dos Vinhos Verdes sub-região do Lima, concretamente no concelho de Ponte de Lima distrito de Viana do Castelo, no noroeste de Portugal, a uma altitude de 50 metros (Figura 1a). A escolha desta vinha deve-se ao seu histórico de elevada incidência de míldio, o que a torna um local apropriado para analisar a evolução da doença. Além disso, a região vitícola dos Vinhos Verdes caracteriza-se por um clima húmido, com elevados níveis de precipitação e humidade relativa, condições propícias ao desenvolvimento do fungo. Assim, a seleção desta vinha permite garantir que o estudo decorra num ambiente representativo dos desafios enfrentados na viticultura em climas húmidos.

O ensaio experimental foi estruturado em dois blocos de 0,14 hectares cada. Um dos blocos recebeu tratamentos fitossanitários (representado a azul-claro na Figura 1b), enquanto o outro permaneceu sem qualquer aplicação de produtos de proteção (assinalado a vermelho na Figura 1b). Cada bloco é composto por seis fileiras de videiras, sendo que as duas centrais desempenham a função de zona de tampão, reduzindo a interferência entre as zonas tratadas e não tratadas.

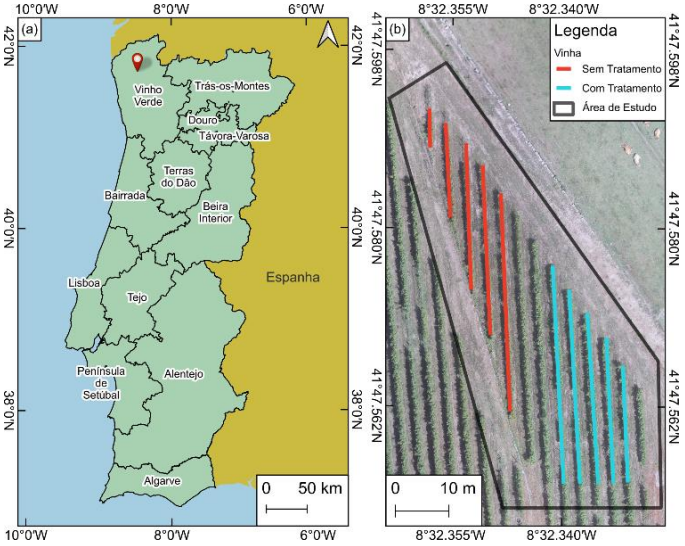


Figura 1. Localização da área de estudo em Portugal continental **(a)**. O esquema experimental **(b)** mostra as videiras sem tratamento (a vermelho) e as videiras submetidas a tratamento (a azul-claro).

2.2. Recolha de dados de espetroscopia de campo

A recolha de dados foi realizada utilizando um espectro-radiómetro de campo ASD FieldSpec® 4, equipado com uma sonda de contacto e uma lâmpada de halogéneo de tungsténio. Esta configuração permitiu obter medições precisas da reflectância das folhas, assegurando a uniformidade dos dados recolhidos.

Para garantir a representatividade e a fiabilidade das medições, cada folha foi submetida a três leituras espectrais consecutivas. As leituras foram classificadas de acordo com a presença ou ausência de sintomas de infeção por míldio, permitindo uma análise diferenciada entre folhas saudáveis e infetadas.

A amostragem foi realizada em condições de campo, sem remoção das folhas da planta, preservando o seu estado natural. As leituras foram realizadas ao longo do ciclo vegetativo num total de 6 datas, 20 e 27 de julho, 3, 8, 21 e 24 de agosto. Em cada zona de estudo, foram selecionadas 30 folhas apresentando sintomas visíveis de infeção por míldio e outras 30 folhas sem quaisquer sinais da doença. Esta abordagem garantiu a recolha de um conjunto de dados representativo das variações espectrais associadas à presença da doença.

2.3. Análise e Processamento dos dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de medições espectrais, que foram analisados e exportados no programa ViewSpectPro e armazenadas num ficheiro Excel e analisados através do software R, versão 4.5.0. A variável de resposta, correspondente ao estado de infeção das amostras (Infetado ou Não Infetado), foi convertida para um formato binário (0 = Infetado, 1 = Não Infetado) para permitir a modelação. As variáveis explicativas corresponderam às medições espectrais ao longo de diferentes comprimentos de onda.

Para garantir uma avaliação robusta do modelo, os dados foram divididos de forma estratificada em dois subconjuntos: 80% para treino e 20% para teste, assegurando que a distribuição das classes fosse preservada em ambos os conjuntos.

O modelo de Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA) foi ajustado para diferenciar as amostras infetadas das não infetadas com base no seu espectro. A escolha do número ótimo de componentes latentes foi realizada através de validação cruzada, sendo este definido com base na análise do Erro Quadrático Médio de Previsão (Root Mean Squared Error of Prediction, RMSEP). Após a determinação do número ideal de componentes, o modelo foi aplicado ao conjunto de teste para prever o estado de infeção das amostras. As previsões foram convertidas em classes binárias utilizando um limiar de decisão de 0.5.

A avaliação da performance do modelo foi realizada através de diversas métricas, incluindo a matriz de confusão, precisão, recall, F1-score, Kappa de Cohen e a área sob a curva ROC (AUC-ROC). A análise da curva ROC permitiu visualizar a capacidade discriminativa do modelo.

Adicionalmente, foi realizada uma análise exploratória das respostas espectrais das amostras infetadas e não infetadas. Foram geradas curvas médias espectrais para cada classe, permitindo a observação das diferenças nos padrões de resposta espectral. Além disso, foi analisada a importância de cada comprimento de onda na discriminação das classes, sendo identificados os 20 comprimentos de onda mais relevantes para a classificação.

Todas as análises foram realizadas utilizando a linguagem R e diversas bibliotecas especializadas para modelação estatística, manipulação de dados e visualização gráfica.

2.4. Infeção das videiras e tratamentos fitossanitários

Na parcela da vinha onde não foram aplicados tratamentos fitossanitários, a infeção evoluiu naturalmente ao longo das diferentes datas de recolha. Desde a primeira data (20 de julho), os efeitos da doença tornaram-se visivelmente mais pronunciados, afetando significativamente a copa das videiras. A ausência de medidas de controlo permitiu a propagação do míldio, o que resultou no agravamento dos sintomas observados, nomeadamente o aparecimento de manchas de óleo, manchas necróticas, necrose, redução da área fotossintética e comprometimento do desenvolvimento dos cachos nas últimas avaliações.

Por outro lado, na zona tratada, foram efetuadas aplicações de produtos fitossanitários com o objetivo de controlar o míldio, seguindo um intervalo de 15 dias entre tratamentos. A decisão foi tomada pelo produtor, respeitando as práticas habituais da região dos Vinhos Verdes e em função das condições atmosféricas. Em determinadas circunstâncias, os tratamentos foram realizados antecipadamente devido à previsão de precipitação, uma vez que a chuva desempenha um papel fundamental na disseminação da doença. Para combater as infeções fúngicas, foram utilizadas substâncias que minimizam o risco de resistências cruzadas, assegurando que cada princípio ativo fosse aplicado dentro dos limites estabelecidos pela regulamentação.

3. Resultados

O gráfico expõe as curvas médias espectrais de folhas de videira afetadas (vermelho) e não afetadas (azul-claro), possibilitando a identificação de

discrepâncias na refletância ao longo do espectro eletromagnético (Figura 2). Na região do visível (400-700 nm, RGB), as folhas infetadas apresentam maior refletância, quando comparadas com as folhas não infetadas, especialmente na região do vermelho (600-700 nm), onde a absorção da luz deveria ser mais eficiente em folhas saudáveis. No Rededge (700-750 nm), a transição é ligeiramente mais suave nas folhas infetadas, o que sugere uma menor concentração de clorofila e uma atividade fotossintética reduzida.

Na região do infravermelho próximo (NIR, 750-1300 nm), as folhas infetadas apresentam uma maior refletância, o que pode ser explicado por alterações estruturais na célula e desorganização dos tecidos internos, resultando num maior espalhamento da luz. Já no infravermelho de ondas curtas (SWIR, 1300-2500 nm), a maior refletância das folhas infetadas em alguns intervalos, como 1400-1900 nm, sugere que existe alterações na transpiração da videira (zona associada ao teor de água na folha). Estas diferenças espectrais demonstram o potencial da deteção remota para uma identificação precoce do míldio, permitindo um planeamento mais eficiente da monitorização e gestão da vinha.

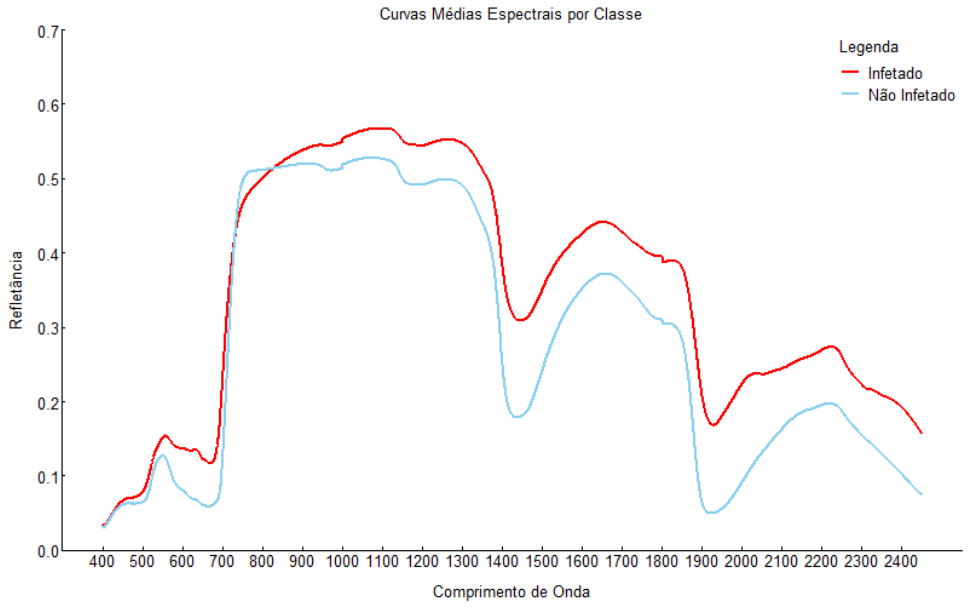


Figura 2. Os dados de espectroscopia de campo, variando entre 400 e 2450 nm, das médias de todas a leituras classificadas como folhas infetadas com míldio (representada pela linha vermelha) e a outra sem infeção (representada pela linha azul-claro).

Os resultados da análise PLS-DA destacaram os 20 comprimentos de onda como os mais relevantes para a discriminação das classes, situando-se entre a faixa dos 699 nm e 718 nm. A elevada contribuição destes comprimentos de onda indica uma forte relação entre essa região espectral e a presença da doença do míldio, sugerindo que essa faixa concentra a maior parte da informação útil para a

diferenciação das amostras. A inclusão destes comprimentos de onda no modelo PLS-DA resultou numa melhoria da capacidade de separação entre as classes e num aumento da robustez preditiva, refletindo-se em métricas de desempenho mais elevadas. Além disso, a concentração da importância nesta faixa espectral pode indicar uma redundância reduzida nos dados, favorecendo um modelo mais eficiente e interpretável.

A curva ROC (Receiver Operating Characteristic) obtida para o modelo, demonstra um bom desempenho na separação das classes, com a curva significativamente afastada da diagonal de referência, indicando uma elevada capacidade discriminativa (Figura 3). A rápida ascensão da sensibilidade em relação à especificidade sugere que o modelo consegue classificar corretamente a maioria das amostras, minimizando falsos positivos e falsos negativos. A área sob a curva (AUC) estimada 0.947, reforçando a eficácia do modelo na tarefa de classificação.

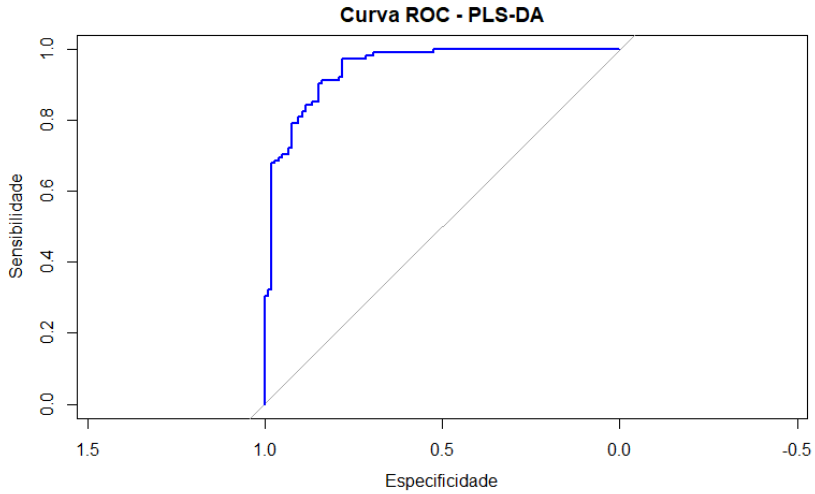


Figura 3. Curva ROC do modelo PLS-DA. A curva representa o desempenho do modelo de classificação, mostrando a relação entre a sensibilidade (verdadeiros positivos) e especificidade (falsos positivos). A curva azul indica uma boa capacidade discriminativa do modelo, com uma área sob a curva (AUC) de 0.947. A linha diagonal representa o desempenho de um classificador aleatório.

Os resultados da classificação obtidos pelo modelo PLS-DA, treinado com dados do espetro-radiómetro portátil, para a deteção da doença do míldio indicam um desempenho global satisfatório, com uma precisão global (PG) de 87,7% (Tabela 1).

Relativamente ao desempenho por classe, a classe não infetado apresentou os melhores resultados, com uma precisão de 0,824, um recall de 0,974 e um F1-score de 0,894, sugerindo uma elevada capacidade de identificação de videiras saudáveis. O alto valor de recall nesta classe indica que o modelo foi eficaz na deteção da maioria das plantas não infetadas, embora a precisão ligeiramente inferior sugira a presença de alguns falsos positivos.

Por outro lado, a classe infetada registou uma precisão de 0,964, um recall de 0,771 e um F1-score de 0,857. A elevada precisão indica que a maioria das videiras classificadas como infetadas estavam corretamente identificadas. No entanto, o valor de recall mais baixo sugere que o modelo teve dificuldades em identificar alguns casos de infeção, resultando em falsos negativos, o que pode ter implicações na deteção precoce da doença.

A média das métricas de desempenho foi de 0,894 para a precisão, 0,873 para o recall e 0,876 para o F1-score, demonstrando um equilíbrio razoável entre a identificação correta das duas classes e a taxa de erro do modelo.

Tabela 1. Exibe os resultados das métricas principais, nomeadamente (Precisão, Recall, F1, Kappa e precisão global do teste do modelo do PLS-DA entre os grupos.

Classe	Precisão	Recall	F1-score	Amostras	Kappa	Precisão Global
Infetado	0.964	0.771	0.857	105	0.752	0.877
Não Infetado	0.824	0.974	0.894	115		
Média	0.894	0.873	0.876	220		

4. Discussão

A identificação do comportamento espectral das doenças na cultura da vinha como o míldio é um ponto fundamental para uma gestão eficiente das vinhas. Esta capacidade de detetar a ocorrência antes da mesma ter um grande impacto no desenvolvimento vegetativo e produtivo e fundamental para uma prática agrícola sustentável na vinha [4].

A análise dos resultados obtidos a partir das curvas espectrais e do modelo PLS-DA fornece uma visão abrangente sobre a discriminação entre folhas de videira infetadas e não infetadas pelo míldio. A avaliação das curvas médias espectrais evidencia diferenças significativas na refletância entre folhas infetadas e não infetadas, sendo especialmente relevantes na região do visível (400-700 nm, RGB), no rededge (680-780 nm) e no infravermelho próximo (NIR, 780-1300 nm) [20].

Na região do visível, as folhas infetadas apresentam maior refletância, particularmente na faixa do vermelho (~600-700 nm), onde normalmente a absorção da luz deveria ser mais eficiente. Esse aumento de refletância sugere uma redução na atividade fotossintética e possíveis alterações nos pigmentos, impactando diretamente a fisiologia da planta. No rededge, a transição espectral é mais suave nas folhas infetadas, indicando uma menor concentração de clorofila e, consequentemente, uma fotossíntese menos eficiente. Já no infravermelho

próximo, a maior refletância observada nas folhas infetadas pode ser explicada por alterações estruturais nas células e pela desorganização dos tecidos internos (necroses), o que favorece um maior espalhamento da luz [21].

Nas outras regiões do espetro, como o infravermelho de ondas curtas (SWIR, 1300-2500 nm), também se verificaram diferenças na refletância, ainda que menos expressivas. O aumento da refletância em determinados intervalos (1400-1900 nm) sugere perda de água e alterações nos processos de transpiração, fatores que podem agravar os efeitos da infeção [20]. Estes resultados indicam que a deteção remota pode ser uma ferramenta eficaz para a identificação precoce do míldio e otimização da monitorização das vinhas.

O modelo PLS-DA destacou 20 comprimentos de onda como os mais relevantes para a separação entre folhas infetadas e não infetadas, situando-se entre 699 nm e 718 nm. A elevada importância desta faixa espectral sugere que grande parte da informação discriminativa da doença está concentrada neste intervalo. A inclusão destes comprimentos de onda no modelo aumentou a robustez preditiva, melhorando a separação entre as classes e reduzindo redundâncias nos dados.

A curva ROC indicam que o modelo PLS-DA apresenta um desempenho robusto na classificação, com uma separação clara entre as classes. A elevada AUC sugere uma boa capacidade preditiva, embora seja importante avaliar possíveis melhorias, como otimização dos hiperparâmetros ou refinamento das variáveis utilizadas, para maximizar a precisão e a generalização do modelo.

A classificação demonstram um desempenho global satisfatório, com uma precisão global de 87,7%. A classe não infetado obteve uma precisão de 0,824, um recall de 0,974 e um F1-score de 0,894, indicando que o modelo identificou corretamente a maioria das folhas saudáveis, embora a precisão ligeiramente inferior sugira a presença de alguns falsos positivos. Já a classe infetada apresentou uma precisão de 0,964, um recall de 0,771 e um F1-score de 0,857. A elevada precisão indica que a maioria das folhas classificadas como infetadas estavam corretamente identificadas, mas o menor recall sugere dificuldades na identificação de alguns casos de infeção pela presença de todos os estados da infeção (manchas de óleo até as necroses), resultando em falsos negativos, o que pode comprometer a deteção precoce da doença. A média das métricas foi de 0,894 para a precisão, 0,873 para o recall e 0,876 para o F1-score, demonstrando um desempenho global equilibrado do modelo. O coeficiente Kappa de 0,752 reforça a confiabilidade do modelo ao indicar um nível substancial de concordância entre as previsões e os valores reais.

Os resultados obtidos demonstram que a análise espectral, combinada com modelos de aprendizagem automática como o PLS-DA, pode ser uma abordagem eficaz para a deteção precoce das doenças do míldio indo de encontro ao trabalho desenvolvido por Wang Y. et al [22] em doenças virais. As discrepâncias espectrais identificadas permitem a diferenciação entre folhas infetadas e não infetadas, e o modelo demonstrou um desempenho promissor na classificação, embora ainda apresente desafios na redução de falsos negativos na classe infetada. A melhoria do modelo pode ser alcançada através da inclusão de mais dados de treino, ajuste de hiperparâmetros e exploração de técnicas adicionais de pré-processamento espectral. Além disso, a integração desta abordagem em sistemas de deteção remota pode facilitar a monitorização em larga escala, permitindo uma gestão mais eficiente da doença nas vinhas.

5. Conclusões

Este estudo demonstrou a eficácia da espectroscopia de campo, aliada a técnicas de modelação estatística como o PLS-DA, na identificação precoce de infeções por míldio em *Vitis vinifera* cv. Loureiro. As análises espectrais permitiram diferenciar com precisão folhas infetadas e não infetadas, sobretudo nas regiões do visível, rededge e infravermelho próximo, destacando-se a faixa entre os 699 e os 718 nm como particularmente relevante. O modelo alcançou um desempenho robusto, com uma precisão global de 87,7%, evidenciando o potencial desta abordagem para aplicação em viticultura de precisão.

A deteção precoce de doenças através de dados espectrais possibilita uma resposta mais célere e dirigida, contribuindo para uma gestão mais sustentável da vinha e redução do uso excessivo de produtos fitossanitários. A análise detalhada dos espectros e a performance do modelo reforçam a utilidade da tecnologia na monitorização da sanidade vegetal.

Trabalhos futuros deverão centrar-se na otimização dos hiperparâmetros do modelo, de forma a melhorar ainda mais a sua capacidade preditiva, bem como na recolha de dados ao longo de dois anos consecutivos, de modo a garantir a robustez e consistência das previsões. Além disso, será fundamental realizar uma análise mais detalhada comparando as respostas espectrais em diferentes fases da infeção, permitindo uma abordagem mais refinada e eficaz na deteção e caracterização do míldio.

Contributos dos Autores: Conceptualização, F.P., L.P., J.J.S. e C.A-P.; metodologia, F.P., L.P. e C.A-P.; software, F.P.; validação, F.P., J.J.S., C.A-P. e L.P.; análise formal, F.P.; investigação, F.P.; recursos, L.P., C.A-P.; curadoria de dados, F.P.; redação—preparação do rascunho original, F.P.; redação—revisão e edição, J.J.S., C.A-P. e L.P.; visualização, F.P., C.A-P. e L.P.; supervisão, J.J.S., C.A-P. e L.P.;

gestão do projeto, C.A-P. e L.P.; obtenção de financiamento, C.A-P. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta investigação foi financiada através de fundos provenientes da proMetheus—Research Unit on Energy, Materials and Environment for Sustainability (https://doi.org/10.54499/UIDP/05975/2020.

Declaração de Disponibilidade dos Dados: Os dados que sustentam este estudo estão disponíveis mediante pedido razoável ao autor correspondente.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer o apoio institucional fornecido pela Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, pela cedência do acesso à vinha experimental que permitiu a realização deste estudo. Este trabalho foi também apoiado por UIDB/05937/2020 Center for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS) (https://doi.org/10.54499/UIDB/05937/2020), através de fundos nacionais provenientes de FCT – Portuguese Foundation for Science and Technology e UID/DB/04033/2020 Centre for the Research and Technology of Agro-Environmental and Biological Sciences (https://doi.org/10.54499/UIDB/04033/2020) , LA/P/0126/2020 Institute for Innovation, Capacity Building and Sustainability of Agri-Food Production (https://doi.org/10.54499/LA/P/0126/2020).

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não existir conflitos de interesse. As entidades financiadoras não tiveram qualquer intervenção no desenho do estudo; na recolha, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, nem na decisão de publicar os resultados.

References

1. Buonassisi, D.; Colombo, M.; Migliaro, D.; Dolzani, C.; Peressotti, E.; Mizzotti, C.; Velasco, R.; Masiero, S.; Perazzolli, M.; Vezzulli, S. Breeding for Grapevine Downy Mildew Resistance: A Review of "Omics" Approaches. *Euphytica* **2017**, *213*, 103, doi:10.1007/s10681-017-1882-8.
2. Hernández, I.; Silva, R.; Melo-Pinto, P.; Gutiérrez, S.; Tardaguila, J. Early Detection of Downy Mildew in Vineyards Using Deep Neural Networks for Semantic Segmentation. *Biosystems Engineering* **2025**, *252*, 15–31, doi:10.1016/j.biosystemseng.2025.02.007.
3. Zhang, Z.; Qiao, Y.; Guo, Y.; He, D. Deep Learning Based Automatic Grape Downy Mildew Detection. *Front. Plant Sci.* **2022**, *13*, doi:10.3389/fpls.2022.872107.
4. Portela, F.; Sousa, J.J.; Araújo-Paredes, C.; Peres, E.; Morais, R.; Pádua, L. A Systematic Review on the Advancements in Remote Sensing and Proximity Tools for Grapevine Disease Detection. *Sensors* **2024**, *24*, 8172, doi:10.3390/s24248172.
5. Lee, W.S.; Tardaguila, J. Pest and Disease Management. In *Advanced Automation for Tree Fruit Orchards and Vineyards*; Vougioukas, S.G., Zhang, Q., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2023; pp. 93–118 ISBN 978-3-031-26941-7.
6. Portela, F.; Paredes, C.A.; Sousa, J.J.; Pádua, L. The Potential of Thermal Imaging to Assist Winemakers in the Detection of Downy Mildew in Vitis Vinifera Cv Loureiro. *Procedia Computer Science* **2025**, *256*, 78–85, doi:10.1016/j.procs.2025.02.098.
7. Soriano-Disla, J.M.; Janik ,Les J.; Viscarra Rossel ,Raphael A.; Macdonald ,Lynne M.; and McLaughlin, M.J. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Applied Spectroscopy Reviews* **2014**, *49*, 139–186, doi:10.1080/05704928.2013.811081.
8. Farber, C.; Shires, M.; Ong, K.; Byrne, D.; Kurouski, D. Raman Spectroscopy as an Early Detection Tool for Rose Rosette Infection. *Planta* **2019**, *250*, 1247–1254, doi:10.1007/s00425-019-03216-0.
9. Farber, C.; Mahnke, M.; Sanchez, L.; Kurouski, D. Advanced Spectroscopic Techniques for Plant Disease Diagnostics. A Review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *118*, 43–49, doi:10.1016/j.trac.2019.05.022.
10. Machado, S.; Barreiros, L.; Graça, A.R.; Madeira, M.; Páscoa, R.N.M.J.; Segundo, M.A.; Lopes, J.A. Assessing the Differences of Two Vineyards Soils' by NIR Spectroscopy and Chemometrics. *Heliyon* **2023**, *9*, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e23000.
11. Bureau, S.; Ruiz, D.; Reich, M.; Gouble, B.; Bertrand, D.; Audergon, J.-M.; Renard, C.M.G.C. Rapid and Non-Destructive Analysis of Apricot Fruit Quality Using FT-near-Infrared Spectroscopy. *Food Chemistry* **2009**, *113*, 1323–1328, doi:10.1016/j.foodchem.2008.08.066.
12. ElMasry, G.; Wang, N.; ElSayed, A.; Ngadi, M. Hyperspectral Imaging for Nondestructive Determination of Some Quality Attributes for Strawberry. *Journal of Food Engineering* **2007**, *81*, 98–107, doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.10.016.

13. Sánchez, M.-T.; De la Haba, M.-J.; Guerrero, J.-E.; Garrido-Varo, A.; Pérez-Marín, D. Testing of a Local Approach for the Prediction of Quality Parameters in Intact Nectarines Using a Portable NIRS Instrument. *Postharvest Biology and Technology* **2011**, *60*, 130–135, doi:10.1016/j.postharvbio.2010.12.006.
14. Zhang, Y.; Zheng, L.; Li, M.; Deng, X.; Ji, R. Predicting Apple Sugar Content Based on Spectral Characteristics of Apple Tree Leaf in Different Phenological Phases. *Computers and Electronics in Agriculture* **2015**, *112*, 20–27, doi:10.1016/j.compag.2015.01.006.
15. Maimaitiyiming, M.; Ghulam, A.; Bozzolo, A.; Wilkins, J.L.; Kwasniewski, M.T. Early Detection of Plant Physiological Responses to Different Levels of Water Stress Using Reflectance Spectroscopy. *Remote Sensing* **2017**, *9*, 745, doi:10.3390/rs9070745.
16. Ryckewaert, M.; Héran, D.; Simonneau, T.; Abdelghafour, F.; Boulord, R.; Saurin, N.; Moura, D.; Mas-Garcia, S.; Bendoula, R. Physiological Variable Predictions Using VIS–NIR Spectroscopy for Water Stress Detection on Grapevine: Interest in Combining Climate Data Using Multiblock Method. *Computers and Electronics in Agriculture* **2022**, *197*, 106973, doi:10.1016/j.compag.2022.106973.
17. Hamed, S.; Altana, A.; Lugli, P.; Petti, L.; Ibba, P. Supervised Classification and Circuit Parameter Analysis of Electrical Bioimpedance Spectroscopy Data of Water Stress in Tomato Plants. *Computers and Electronics in Agriculture* **2024**, *226*, 109347, doi:10.1016/j.compag.2024.109347.
18. Zahir, S.A.D.M.; Omar, A.F.; Jamlos, M.F.; Azmi, M.A.M.; Muncan, J. A Review of Visible and Near-Infrared (Vis-NIR) Spectroscopy Application in Plant Stress Detection. *Sensors and Actuators A: Physical* **2022**, *338*, 113468, doi:10.1016/j.sna.2022.113468.
19. Rodríguez-Pérez, J.R.; Marcelo, V.; Pereira-Obaya, D.; García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E. Estimating Soil Properties and Nutrients by Visible and Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy to Characterize Vineyards. *Agronomy* **2021**, *11*, 1895, doi:10.3390/agronomy11101895.
20. Vélez, S.; Barajas, E.; Rubio, J.A.; Pereira-Obaya, D.; Rodríguez-Pérez, J.R. Field-Deployed Spectroscopy from 350 to 2500 Nm: A Promising Technique for Early Identification of Powdery Mildew Disease (Erysiphe Necator) in Vineyards. *Agronomy* **2024**, *14*, 634, doi:10.3390/agronomy14030634.
21. Mickey Wang, Y.; Ostendorf, B.; Pagay, V. Evaluating the Potential of High-Resolution Hyperspectral UAV Imagery for Grapevine Viral Disease Detection in Australian Vineyards. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2024**, *130*, 103876, doi:10.1016/j.jag.2024.103876.
22. Wang, Y.M.; Ostendorf, B.; Pagay, V. Detecting Grapevine Virus Infections in Red and White Winegrape Canopies Using Proximal Hyperspectral Sensing. *Sensors* **2023**, *23*, 2851, doi:10.3390/s23052851.

Nuevo dispositivo mediante sensores infrarrojos térmicos para RPAS utilizado en el monitoreo del estado hídrico de cultivos agrícolas

J. J. Pérez-Paredes [1], G.J. López-Canteñs [1]*, R. Arteaga-Ramírez [1], J. C. Olguin-Rojas [2], E. Romantchik-Kriuchkova [1]

[1] Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo; josjan_@hotmail.com

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

* Correspondencia: alelopez10@hotmail.com; Tel.: (+52 5959521500 ext.5556)

Abstract: The measurement of canopy temperature by thermal imaging has been introduced as a technique for the assessment of moderate to severe water status, although these methods are not accessible to many producers due to the high costs of thermal cameras and RPAS. Due to the above, and the need to determine water status using low-cost remote sensors, this paper presents the development of a thermal camera, using an infrared (IR) sensor for measuring canopy temperature in agricultural crops and used in the monitoring of water status, the device consists of a sensor "MLX906402" and a microcontroller "Teensy 3.6. The developed device was mounted on an RPAS and evaluated by flying at high altitudes over a grassy surface, 5 thermal photos were taken in each flight, from which a sample was obtained and compared with values of 30 randomly measured data with a laser infrared thermometer.

Keywords: Thermal camera 1; Infrared sensors 2; Canopy temperatura 3; Water stress 4.

1. Introducción

El monitoreo de los cultivos y la evaluación el estado hídrico es necesario para optimizar el uso eficiente del agua, mejorar calidad del cultivo y la producción [1]. Un buen indicador de estrés hídrico proporciona información sobre el estado de agua en las plantas, pero también puede proporcionar una buena predicción de los efectos del riego deficitario en la producción agrícola [2]. Se requiere optimizar y mejorar los métodos para el reconocimiento de estrés hídrico, generando una programación óptima de riego a lo largo de la temporada de crecimiento, disminuyendo el daño de la producción y la pérdida de rendimiento mediante una producción agrícola responsable [3].

Estudios recientes han demostrado que la medición de la temperatura del dosel se ha utilizado para detectar estrés hídrico de niveles moderados a severos en las

plantas. La relación entre la temperatura de las hojas y la regulación estomática establece que cuando un cultivo pose un suministro de agua adecuado aumenta la conductancia estomática y por lo tanto mejora la transpiración de las hojas generando una disminución de temperatura debido al enfriamiento por la evaporación del agua, ya que al perderse agua a través de los estomas se reduce la temperatura [4] [1] [5].

Por los siguiente, la temperatura de las hojas que transpiran debe ser cercana a la temperatura del aire, mientras que en el caso de las estresadas debe ser mayor. Este es el supuesto permite estimar el estrés hídrico a través de la temperatura del dosel [6] [2] [7].

Los cambios sutiles en la temperatura del dosel se pueden medir con una cámara termográfica o conocida también como cámara infrarroja, que forma una imagen de temperatura utilizando la radiación de onda larga emitida [5]. Estas cámaras son montadas en sistemas aéreos no tripulados que permiten cartografiar las variables espaciales y temporales, mediante la adquisición de las imágenes con una gran resolución espacial y temporal [8].

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar e implementar una cámara térmica de bajo costo, utilizando un microcontrolador Tenseey 3.6 y un sensor infrarrojo (IR) “MLX90640” de 768 pixeles, para su posterior implementación en un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS), con el fin de obtener información georreferenciada de la temperatura del dosel de las plantas, que ayudara en la evaluación del estado hídrico de los cultivos agrícolas en un posterior análisis de la información.

2. Materiales y métodos

La cámara térmica desarrollada se basada en un sensor térmico de infrarrojos (IR) “MLX90640” de sparkfun (Figura 1), una matriz térmica de 32x24 píxeles (768 píxeles), que permite la obtención de la información de temperatura de superficies mediante la radiación de calor emitida por los objetos debido a su emisividad. El sensor infrarrojo es una termopila de tipo transductor electrónico que convierte la energía térmica en una señal eléctrica y funciona según el principio de que todo emite radiación térmica de infrarrojo lejano (FIR) [9].

Figura 1. Sensor MLX90640 (32x24 pixeles).

Características:

- Matriz de infrarrojos de 32x24 píxeles.
- Interfaz digital compatible con I2C
- Frecuencia de actualización programable 0,5Hz...64Hz
- Tensión de alimentación de 3,3 V.
- Consumo de corriente inferior a 23mA
- FOV - 55°x35°
- Temperatura de funcionamiento - 40°C ÷ 85°C

El microcontrolador utilizado en el dispositivo fue la placa de desarrollo Teensy 3.6 (Figura 2), programada en el IDE de Arduino con el complemento de Teensyduino. Este microcontrolador permitió realizar los cálculos para obtener los valores de los 768 pixeles generados por el sensor "MLX90640" y guardar la información de la temperatura en una micro SD, ya que posee un zócalo de tarjetas incorporado.

Figura 2. Teensy 3.6.

2.1 Conexiones y diagrama electrónico

El circuito electrónico fue diseñado para una correcta alimentación y un funcionamiento adecuado de la cámara térmica, cumple con los requerimientos de voltaje y consumo de corriente de todos los dispositivos empleados como lo son: microcontrolador Teensy 3.6, sensor MLX90640 y los leds. En la Figura 3 se muestra el esquema de la cámara térmica conectada con el RPAS.

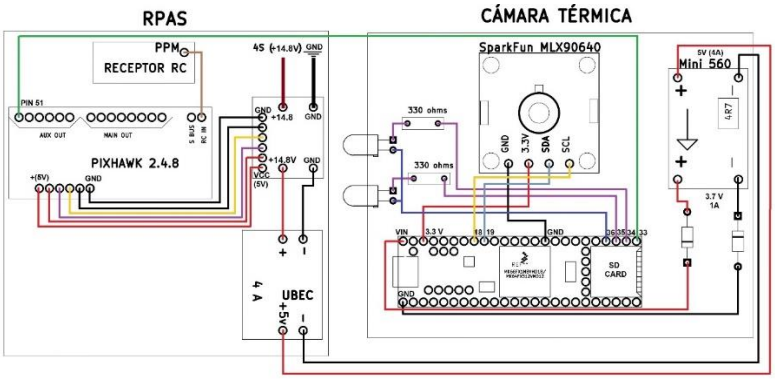


Figura 3. Esquema de conexión

El diagrama electrónico (Figura 3), representa la alimentación y funcionamiento del circuito del dispositivo, iniciando con la alimentación de la batería lipo de 4 celdas con un voltaje nominal de 14.8v, la cual alimenta la controladora de vuelo. El voltaje de la batería llega a un circuito eliminador universal (UBEC), que genera una salida de 5V con una corriente de hasta 4A.

EL sistema de la cámara térmica posee un regulador mini 560 que reduce el voltaje entrante de 5v a 3.7v con una corriente de 1 A, para alimentar al Teensy 3.6, además cuenta con diodos 1n4007 en la salida para proteger el circuito contra picos de corriente, voltajes inversos y elimina el ruido eléctrico presente en la señal principal. El microcontrolador Teensy 3.6 se encargó de alimentar al sensor MLX90640 con un voltaje de 3.3v, y se utilizaron 2 leds para que se enciendan al iniciarse la comunicación serial en entre el sensor y el microcontrolador, además de que parpadea uno de ellos al cada vez que se tome una foto de temperatura. Los puertos SDA y SCL del sensor mlx se conectaron a los pines 46 y 45 respectivamente para la lectura de la información mediante el comando de transferencia de datos I2C.

El puerto AUX OUT 1 (pin 51) del controlador de vuelo pixhawk 2.4.8, se utilizó para activar la cámara, este puerto envía un pulso PWM de RC con una longitud de onda de 1900ms durante 3/10 de segundo al pin 30 del Teensy 3.6, activando la captura de la información térmica en la microSD. Se realizó la conexión de los componentes en una caja protectora de plástico, con las dimensiones de 7 cm de largo, 4.5 cm de alto y 2.3 cm ancho (Figura 4).

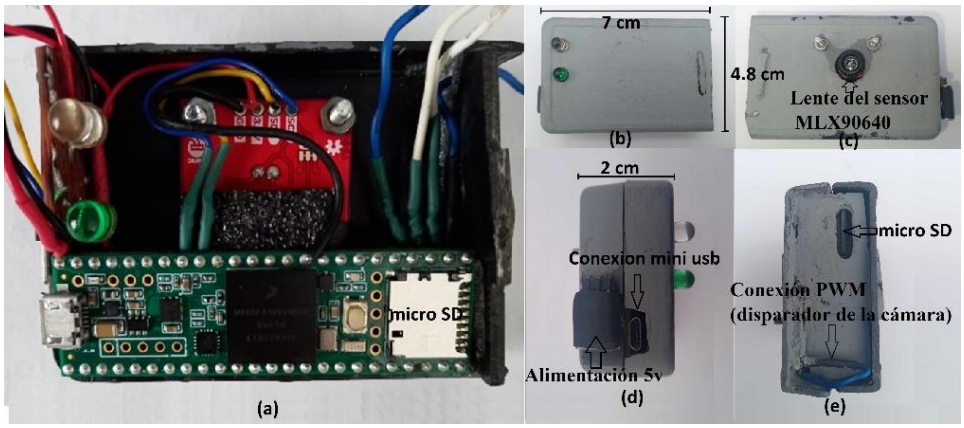


Figura 4. Ensamblado de la cámara térmica (a), vista superior (b), vista inferior (c), vista lateral (d) y vista frontal (e).

2.2 Programación

El programa utilizado en la placa controladora del dispositivo fue desarrollado y compilado el entorno de desarrollo IDE de Arduino versión 1.8.12. Para poder realizar la lectura del sensor y el almacenamiento de datos se realiza la rutina descrita en la Figura 5, en la cual se describen las funciones efectuadas en el microprocesador Teensy 3.6.

Cuando se enciende la cámara térmica se inicializa la comunicación serial a 9600 baudios con la micro SD y se establece la comunicación I2C con el sensor MLX90640, además se genera una carpeta nueva donde se almacenaran todos los nuevos archivos generados en las capturas de datos.

En la función del programa se obtiene la temperatura medida con el sensor MLX90640 y se le realiza una corrección conforme a la emisividad del objeto para después guardarla si se detecta un pulso PWM de 1900us o seguir actualizando las mediciones. Si se detecta un pulso PWM de 1900us la información se guarda en archivos ".txt" y se enumeran de manera ascendente."

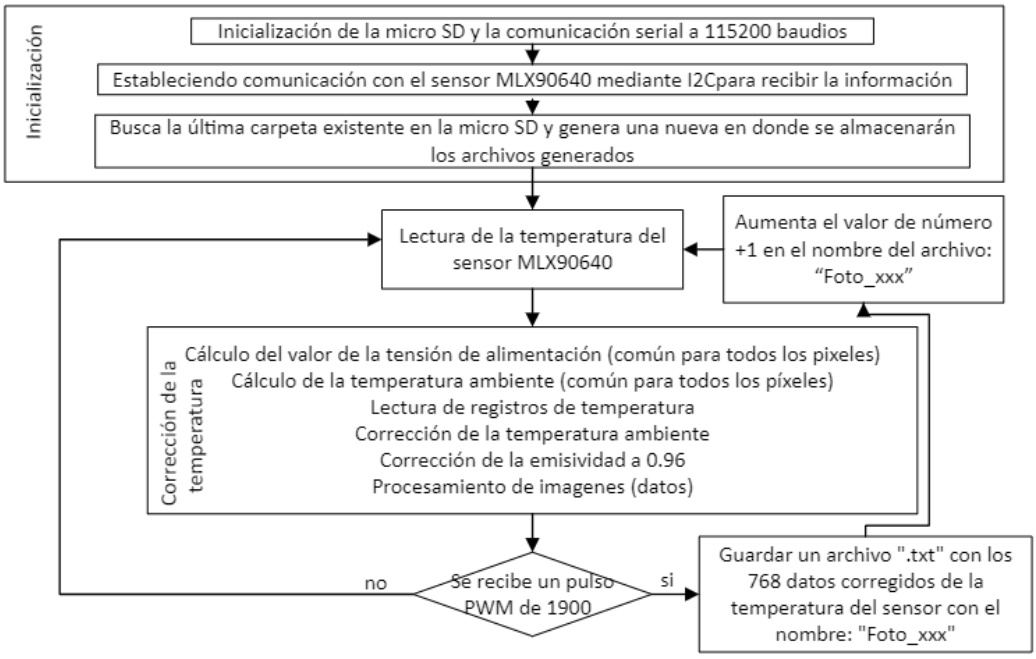
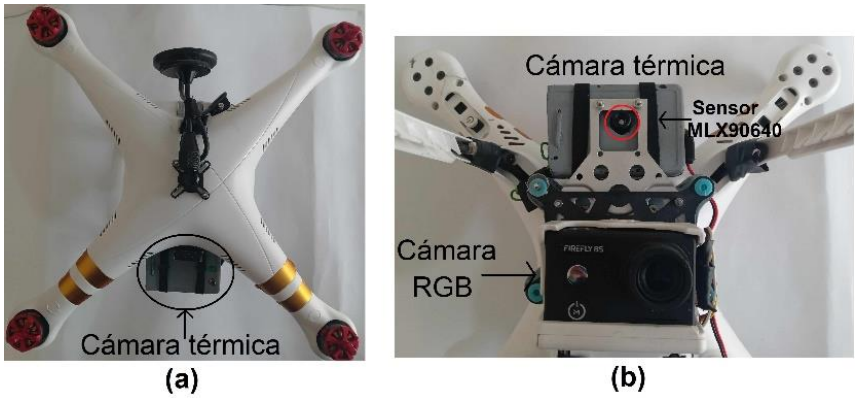


Figura 5. Diagrama de funcionamiento de la cámara térmica.

Para convertir los archivos ".txt" a imágenes se escribió un código en el compilador c++ que abre la carpeta que contiene los archivos con los 768 datos de temperatura y los convierte en imágenes de 32 x 24 pixeles en formato ".tif". Para georreferenciar las nuevas imágenes generadas se utilizó el plan de vuelo con las coordenadas GPS de los puntos de captura de las imágenes (waypoints) y la librería "ExifTool", que es un programa de software de código abierto para escribir los metadatos de las imágenes.

2.3 Montaje en el Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS) y configuración

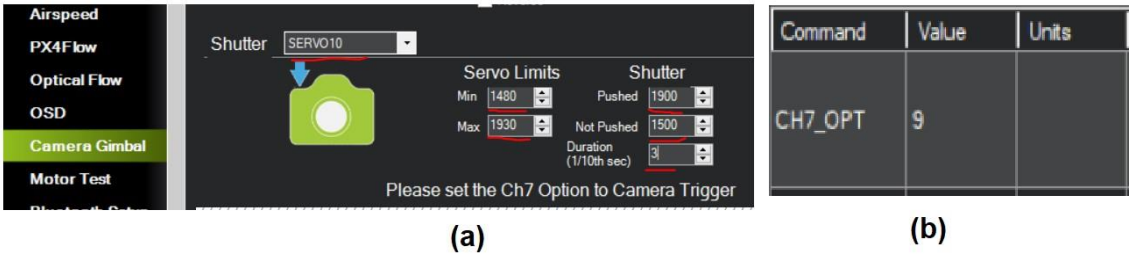
En nuestro caso se utilizó un RPAS de tipo cuadricóptero, con la controladora de vuelo pixhawk 2.4.8 que permito la realización de vuelos autónomos para la obtención de imágenes georreferenciadas mediante GPS. La cámara térmica se instaló en la parte frontal del vehículo aéreo ((Figura 6), junto con una cámara RGB para la obtención de información relacionada con el cultivo.



(a) (b)

Figura 6. Vista superior e inferior de la cámara montada.

Se programo la controladora de vuelo Pixhaw del RPAS con la versión de ardupilot 3.6.11 y se configuro en el software misión planner 3.75. Para la captura de la información, se estableció el disparador de la cámara en el servo 10 del obturador del gimbal (Figura 7, a), el pulso se estableció en 1900 y 1500 en no pulsado, con una duración de 3/10 de segundo. Para la captura de imágenes de forma manual se utilizó el canal 7 del radiocontrol, y se configuro el comando "CH7_OPT" de la lista de parámetros con valor de 9 (Figura 7, b).



(a) (b)

Figura 7. Configuración del disparador de la cámara en mission planner

2.4 Evaluación de la Cámara térmica

El software planificador de misiones de vuelo que se utilizó en los vuelos fue QGroundControl, el cual puede ajustar parámetros, como: la velocidad de vuelo, la altura, la distancia entre líneas de vuelo, el traslape frontal y lateral de las fotos, parámetros que están limitados principalmente por el modelo de la cámara (tipo de lente y distancia focal) y el tiempo máximo de vuelo.

Para la evaluación de la cámara térmica, se realizaron 2 vuelos a dos alturas de 5m y 10m sobre una superficie con pasto. Se tomaron 5 fotos térmicas en cada vuelo, de las cuales se obtuvo un muestreo, que se comparó con los valores de 30 datos medidos aleatoriamente con un termómetro infrarrojo laser.

3. Resultados

El circuito diseñado, alimenta el sistema de manera correcta, alimentándolo con una corriente y voltaje adecuado, además de poseer protecciones contra corrientes inversas y picos de voltaje que pueden dañar el microcontrolador y al sensor. La programación del microcontrolador garantiza que cuando reciba un micro impulso PWM mayor a 1600 ms, el sistema será capaz de guardar los datos de temperatura de los 768 pixeles en un archivo ".txt" dentro de la micro SD, en un carpeta nueva y con una numeración ascendente, garantizando que no se repitan nombres, se sustituyan archivos o carpetas cada vez que se enciende el dispositivo.

La resolución de la cámara se obtuvo mediante el teorema de Pitágoras utilizando la altura de vuelo y el ángulo focal de 55° x 35° del sensor, a continuación, se muestra los valores del GSD a diferentes alturas:

Cuadro 1. Resolución de la cámara.

Altura (m)	largo (m)	ancho (m)	largo pixel (cm)	ancho pixel (cm)	Área $(cm)^2$	GSD (cm/pixel)
5	5.2	3.2	16.3	13.1	213.7	14.7
6	6.2	3.8	19.5	15.8	307.8	17.6
7	7.3	4.4	22.8	18.4	418.9	20.6
8	8.3	5.0	26.0	21.0	547.1	23.5
9	9.4	5.7	29.3	23.6	692.4	26.5
10	10.4	6.3	32.5	26.3	854.9	29.4
11	11.5	6.9	35.8	28.9	1034.4	32.3
12	12.5	7.6	39.0	31.5	1231.0	35.3
13	13.5	8.2	42.3	34.2	1444.7	38.2
14	14.6	8.8	45.5	36.8	1675.5	41.2
15	15.6	9.5	48.8	39.4	1923.4	44.1
16	16.7	10.1	52.1	42.0	2188.5	47.0
17	17.7	10.7	55.3	44.7	2470.6	50.0
18	18.7	11.4	58.6	47.3	2769.8	52.9
19	19.8	12.0	61.8	49.9	3086.1	55.9
20	20.8	12.6	65.1	52.5	3419.5	58.8

Los datos obtenidos durante los vuelos a 5m y 10m se evaluaron con los datos de la pistola térmica y muestran que la desviación estándar de la cámara térmica fue 1.6 y 1.29, con una variabilidad más uniforme en comparación del sensor laser de mano con 2.8 y 3.22 (Cuadro 2), por lo que la cámara térmica se recomienda en cultivos de mucho follaje para un muestreo preciso en la medición del dosel.

Cuadro 2. Valores obtenidos con los muestreos de los sensores a distintas alturas.

Sensor	Altura	Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	Máximo y mínimo
MLX90640	5m	28.98	1.63	5.64 %	34.5-25.0
MLX90640	10m	25.95	1.29	4.98 %	30.3-21.2
Laser	5m	33.7	2.86	10.22 %	33.7-23.3
Laser	10m	28.85	3.22	11.16 %	39.1-25

4. Discusión

La utilización de sensores remotos para la evaluación de estrés hídrico en cultivos agrícolas es muy practica debido a su facilidad de toma de datos además puede abarcar una gran cantidad de superficie por vuelo utilizando drones, además, se puede determinar con mayo precisión y exactitud la temperatura en comparación con sensores manuales.

Las desventajas de utilizar cámaras térmicas en drones es que los precios son muy elevados a comparación de sensores manuales, sin embargo la utilización de sensores más económicos como se muestra en este trabajo es una alternativa viable y de bajo costo.

5. Conclusiones

Las características de la cámara térmica como precisión, facilidad de uso, tamaño, alimentación y peso son ideales para ser montada en un RPAS, y establece el dispositivo como una herramienta para un futuro sistema de evaluación del estado hídrico, como una alternativa a las tecnologías actuales, apoyando en las estrategias de monitoreo de los cultivos agrícolas, mediante imágenes infrarrojas térmicas obtenidas con el dispositivo. ayudando al aumento de la eficiencia del uso del agua y una mejora en la producción de cultivos agrícola.

La cámara térmica se comparó con un sensor comercial, dando como resultado una precisión comparable tanto en la temperatura medida, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Sin embargo, se deben realizar futuros trabajos para evaluar la temperatura del dosel en función de estado hídrico de las plantas.

Referencias

1. Noguera, M., Millán, B., Pérez-Paredes, J. J., Ponce, J. M., Aquino, A., & Andújar, J. M. (2020a). A new low-cost device based on thermal infrared sensors for olive tree canopy temperature measurement and water status monitoring. Remote Sensing, 12(4). https://doi.org/10.3390/rs12040723.
2. Ballester, C., Castel, J., Jiménez-Bello, M. A., Castel, J. R., & Intrigliolo, D. S. (2013). Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees. Agricultural Water Management, 122, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.005
3. Bijanzadeh, E., Moosavi, S. M., & Bahadori, F. (2022a). Quantifying water stress of safflower (Carthamus tinctorius L.) cultivars by crop water stress index under different irrigation regimes. Heliyon, 8(3). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09010
4. Gheysari, M., Pirnajmedin, F., Movahedrad, H., Majidi, M. M., & Zareian, M. J. (2021). Crop yield and irrigation water productivity of silage maize under two water stress strategies in semi-arid environment: Two different pot and field experiments. Agricultural Water Management, 255. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106999
5. Sagan, V., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Eblimit, K., Peterson, K. T., Hartling, S., Esposito, F., Khanal, K., Newcomb, M., Pauli, D., Ward, R., Fritschi, F., Shakoor, N., & Mockler, T. (2019). UAV-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring, and plant phenotyping using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermomap cameras. Remote Sensing, 11(3). https://doi.org/10.3390/rs11030330
6. Bijanzadeh, E., Moosavi, S. M., & Bahadori, F. (2022b). Quantifying water stress of safflower (Carthamus tinctorius L.) cultivars by crop water stress index under different irrigation regimes. Heliyon, 8(3). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09010
7. López López, R., Arteaga Ramírez, R., Alberto Vázquez Peña, M., López Cruz, I., & Sánchez Cohen, I. (2009). Índice De Estrés Hídrico Como Un Indicador Del Momento De Riego En Cultivos Agrícolas * Water Stress Index As An Indicator Of Irrigation Timing In Agricultural Crops (Vol. 35).
8. Elsayed, S., Elhoweity, M., Ibrahim, H. H., Dewir, Y. H., Migdadi, H. M., & Schmidhalter, U. (2017). Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of

wheat under different irrigation regimes. Agricultural Water Management, 189, 98–110. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.001

9. García-Tejero, I. F., Gutiérrez-Gordillo, S., Ortega-Arévalo, C., Iglesias-Contreras, M., Moreno, J. M., Souza-Ferreira, L., & Durán-Zuazo, V. H. (2018). Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. Scientia Horticulturae, 238, 91–97. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.045

Desarrollo de modelos de crecimiento en cultivo de lechuga para un riego de precisión

Marta Sánchez Piñero[1], Carlota Bernal-Basurco[2,3], Francisco García Cáceres [1], Carmen Recio Valderrama [1], José Manuel Sánchez Ruiz[4], Esther Hernández-Montes[2,3], Alfonso Moriana Elvira[1], David Pérez-López[2,3], María José Martin-Palomo García[1], Pedro María Castro Valdecantos[1], Ana Centeno[2,3], Rubén Moratiel[2,3], David Benavides Cuevas[4], Francisco José Domínguez Mayo[4], Mireia Corell González[1*]

Departamento de Agronomía, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad de Sevilla.

CEIGRAM, Madrid, Spain, carlota.bernal.basurco@upm.es, esther.hmontes@upm.es, ana.centeno@upm.es, ruben.moratiel@upm.es

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain,

Departamento Lenguajes y Sistemas Informáticos, E.T.S. de Ingeniería Informática. Universidad de Sevilla.

* Correspondence: mcorell@us.es

Abstract: El uso eficiente del agua en la producción hortícola requiere herramientas de apoyo a la decisión que optimicen la programación del riego en función del desarrollo del cultivo. En el marco del proyecto AqualA (Sistema de programación de riego deficitario para cultivos hortícolas ecológicos basado en sensores virtuales IoT e Inteligencia Artificial altamente configurable con Líneas de Producto Software), estamos desarrollando modelos de crecimiento para cultivos hortícolas, centrándonos actualmente en la lechuga, con el objetivo de modelizar su desarrollo y necesidades hídricas. Estos modelos servirán como base para la automatización del riego, integrando datos climáticos, edáficos y de estado del cultivo, combinando información de sensores en campo con datos de imágenes satelitales e inteligencia artificial. En este trabajo se analizó el efecto de diferentes variedades de lechuga bajo distintas estrategias de riego, con el fin de evaluar la respuesta del cultivo y ajustar los modelos desarrollados en condiciones reales. Para la validación de los modelos, se realizó un ensayo en campo en la finca comercial de BIOALVERDE. Se analizaron diferentes modelos de grados día con variables de crecimiento y desarrollo que permiten predecir la cobertura del cultivo en función de variables fácilmente sensorizables, facilitando así la implementación de estrategias de riego deficitario más eficientes.

Keywords:

1. Introducción

La gestión eficiente del agua en la agricultura es un desafío crucial, especialmente en la producción hortícola, donde se considera que el riego es fundamental para

maximizar el rendimiento y la calidad de los cultivos. El proyecto AquaIA se centra en la creación de una herramienta que contribuya a automatizar el riego en cultivos hortícolas ecológicos, que suelen ser sistemas complejos. La modelización del crecimiento vegetal se presenta como una herramienta indispensable para abordar este desafío, permitiendo la automatización del riego en función de las necesidades específicas de cada cultivo o policultivos. Este enfoque no solo optimiza el uso del agua, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a las variaciones climáticas [1].

En este trabajo nos centramos en el desarrollo de modelos de crecimiento para cultivos hortícolas, con parámetros sencillos de medir, que resulten fácilmente sensorizables y proporcionen información valiosa sobre el estado del cultivo y sus necesidades hídricas [2]. La integración de datos climáticos, edáficos y de estado del cultivo, combinando información de sensores en campo con datos de imágenes satelitales e inteligencia artificial, puede permitir desarrollar sistemas de riego automatizados altamente eficientes y configurables[3].

En el caso específico de la lechuga, la modelización de su desarrollo y necesidades hídricas puede facilitar la implementación de estrategias de riego deficitario más precisas y eficientes. La temperatura diaria media y su interacción con otros factores como la concentración de CO2 afectan significativamente el crecimiento de la lechuga. Por ejemplo, se observó que la masa fresca de la lechuga aumentó linealmente con el incremento de la temperatura media diaria, lo que sugiere que el control de la temperatura es esencial para optimizar el uso de grados día en la producción de lechuga [4].

Los ensayos en campo, en fincas comerciales, son esenciales para validar estos modelos en condiciones reales y ajustar las estrategias de riego en función de las respuestas del cultivo. Estudios previos han demostrado que el riego deficitario controlado puede ser una estrategia eficaz en policultivos, permitiendo un uso más eficiente del agua sin comprometer significativamente el rendimiento. El objetivo de este trabajo es estudiar modelos sencillos que nos permitan predecir el crecimiento vegetal con parámetros fácilmente sensorizables para establecer estrategias de riego deficitario que se ajusten a las condiciones de cultivo reales y permitan automatizar las medidas de crecimiento y cálculo de las necesidades de riego.

2. Material y Métodos

El primer ensayo se llevó a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, situada en la Ctra. De Utrera, provincia de Sevilla. Coordenadas 37º21’06” N, 5º56’16” W, altura sobre el nivel del mar 21 metros. El experimento se realizó en exterior en la ETSIA, en dos variedades diferentes de lechuga. En un

ensayo con un diseño experimental de bloques al azar con 3 repeticiones por tratamiento.

Se aplicaron **2 tratamientos de riego diferenciales:**

Control: Este tratamiento tuvo como objetivo mantener condiciones óptimas de crecimiento y desarrollo vegetal, garantizando que las plantas recibían la cantidad de agua necesaria para maximizar su productividad sin restricciones hídricas. Las plantas bajo este tratamiento no experimentaron condiciones de estrés hídrico en ningún momento, ya que se les aplicó un régimen de riego para cubrir el 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) de acuerdo con el manual de la FAO: 56 (Allen 2006) y empleando los datos de la estación climática más cercana: estación meteorológica La Rinconada (SIAR, 2023).

Riego Deficitario Controlado: Las plantas de este tratamiento se sometieron a una reducción progresiva del riego durante la fase intermedia del ciclo de cultivo, justo antes del inicio del acogollado. El objetivo de este tratamiento fue inducir un estrés hídrico controlado que limitara el crecimiento vegetativo de las plantas en un 25% en la fase de acogollado, para ser rehidratada antes de la cosecha y no afectar a la producción final.

Se emplearon 2 cultivares de lechuga diferentes: cv. Parrales, tipo Batavia de hoja suelta y cv Reina de mayo, tipo coss, ambas de la casa comercial Ramiro Arnedo. El cultivo se realizó en mesillas de 1 metro de anchura total, con dos líneas de cultivo, un marco de plantación de 4 plantas.m^{-2}. Las mesillas se cubrieron con plástico negro biodegradable. El sistema de riego fue de alta frecuencia, con goteros insertados, autocompensates y antidrenantes. El trasplante se realizó el 19 de septiembre de 2024 y realizaron dos recolecciones, 19 de noviembre y 3 de diciembre de 2024.

Se llevó a cabo un segundo ensayo de validación, en una finca comercial de la empresa BIOALVERDE, situada en Montequinto (Sevilla). Coordenadas 37°19'51.9"N 5°56'18.3"W, y 53 metros de altura sobre el nivel del mar. En este caso se cultivó una variedad tipo Batavia, de hoja suelta cv Voltron Rz de la casa comercial Rijk Zawaan. El trasplante se realizó el 8 de octubre de 2024, y la recolección se llevó a cabo el 9 de enero de 2025. En este caso se realizó un riego óptimo hasta el inicio del acogollado, momento en el que se restringió el riego en un 50% durante dos semanas, y una posterior rehidratación previa a la cosecha. Esta limitación supuso una reducción de una 20% sobre la ETc en el ciclo completo. La densidad de plantación fue de 2 plantas.m^{-2}, el sistema de riego estaba conformado por líneas de goteros separadas 1 metros, y goteros insertados cada 50 cm.

Medidas del cultivo:

Los datos climáticos se obtuvieron de la estación La Rinconada (SIAR, 2023), incluyendo la evapotranspiración de referencia (ETo), la radiación diaria, y las temperaturas mínima y máxima diarias.

Crecimiento. Se midió la cobertura de la planta se utilizó como una medida del crecimiento de la lechuga, para ello se empleó la aplicación móvil CANOPEO (Oklahoma State University), se midieron siempre 4 plantas en tres repeticiones por parcela (un metro de longitud en una imagen de proporción 9:16), centrando la imagen para para mantener siempre la misma superficie de referencia. Este procedimiento se aplicó a todas las parcelas.

Biomasa: Se midió la biomasa de la planta, mediante el peso fresco de tres lechugas por parcela, utilizando una balanza de laboratorio inmediatamente después de la cosecha. El peso seco se obtuvo por deshidratación de las muestras, en una estufa de desecación con ventilación forzada a una temperatura de 65 °C hasta peso constante, y luego se volvieron a pesar en la misma balanza.

Nº de hojas: Se contabilizó en número de hojas, en tres plantas por parcela.

Superficie foliar. Una vez deshojadas todas las plantas, se tomaron las hojas de cada una de ellas y se midió el área foliar total con un medidor de área foliar (Medidor de área LI-3100C, LICOR, EEUU). Se obtuvo el área foliar por planta.

Modelo de Grados días. Se han calculado los grados días empleando el modelo de grados día de Pathak y Stoddard (2018), para intentar relacionar el desarrollo del cultivo y de los diferentes parámetros biométricos medidos, con la acumulación de GGD. La ecuación empleada para calcular los grados días fue:

$$GD = \left(\frac{\mathrm{T^a max} + \mathrm{T^a min}}{2}\right) - \mathrm{T^a base}$$

Considerando:

Tª base: temperatura base 10ºC

Tª umbral de crecimiento superior: 30ºC

Calculamos ((Tª max+ Tª min)/2). Si este valor está entre Tª base y Tª umbral los grados día son ((Tª max+tmin)/2)- Tª base. Donde Tª max y Tª min son respectivamente la máxima y la mínima del día

Si ((Tª max+ Tª min)/2) es MENOR que Tª base la acumulación de grados día es 0.

Si ((Tª max+ Tª min)/2) es MAYOR que Tª umbral la acumulación de grados día es 20.

Para la relación de acumulación de los grados días (SGDD) desde la fecha de trasplante y los parámetros de crecimiento y desarrollo estudiados se acumularon los Grados días diarios desde el trasplante.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el software STATISTIX.8, se realizaron los análisis de la varianza. Se muestran las diferencias en tablas mediante letras diferentes y en los gráficos con asteriscos. Los diferentes gráficos representados en este Trabajo se realizaron usando el software Sigmaplot Versión 11.

Se realizaron regresiones entre los grados día acumulados y los parámetros de crecimiento y desarrollo medidos en ambas variedades. Los análisis estadísticos de estas regresiones fueron realizados con el programa "Statistix 8". Con los resultados obtenidos en este programa se llevó a cabo el procedimiento para comparar 2 rectas. En primer lugar, para comparar la pendiente hay que hacer un T de student cuya fórmula para calcularla es la siguiente:

$$T=\frac{b1-b2}{\sqrt{\left(\frac{1}{\sum(x1-x1med)^2}+\frac{1}{\sum(x2-x2med)^2}\right)sp^2}}$$

Siendo:

$$Sp^2=\frac{\sum(y1-y1med)^2-\frac{[\sum(x1-x1med)(y1-y1med)]^2}{\sum(x1-x1med)^2}+\sum(y2-y2med)^2-\frac{[\sum(x2-x2med)(y2-y2med)]^2}{\sum(x2-x2med)^2}}{n1-2+n2-2}$$

b: pendiente de cada recta

x: datos de potencial de la recta

y: datos de la variable climática que se esté comparando (Tª ó DPV)

Una vez obtenida la T, se compara con la T de dos colas y con n-4 grados de libertad.

En segundo lugar, para comparar el término independientes de las rectas se utiliza una distribución F.

$$F=\frac{B-A}{\left[\frac{A}{sus\ grados\ de\ libertad}\right]}$$

Siendo:

A: La suma de cuadrados de los residuos de las regresiones por separado.

B: La suma de cuadrados de los residuos de las regresiones juntas.

Una vez obtenida F, se compara. Los grados de libertad de B-A es 1 y los grados de libertad de A es el número de datos de las dos ecuaciones juntas menos 4.

3. Resultados y discusión.

3.1. Modelado del crecimiento vegetal

La cobertura del suelo resultó ser un excelente indicador del crecimiento del cultivo en este ensayo, siendo el parámetro que presentó el mejor ajuste en ambas variedades estudiadas y en los dos tratamientos de riego aplicados. Se analizaron por separado las ecuaciones de cada variedad y tratamiento, sin encontrarse diferencias significativas ni en la pendiente ni en el término independiente de las rectas. Por tanto, se optó por representar un modelo único de regresión lineal con todos los datos del ensayo: %Cobertura de suelo = 0,0951 × GDA + 4,3069; R^2 = 0,9062. El análisis de regresión lineal fue altamente significativo (Figura 1a).

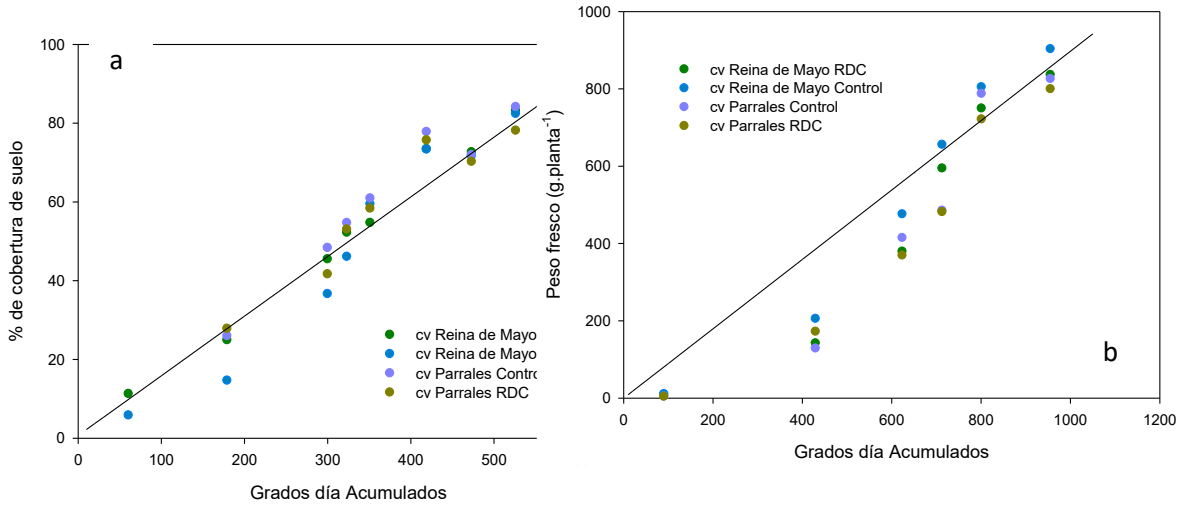


Figura 1, a: Relación entre Cobertura de suelo y grados día acumulados en los dos cvs estudiados, Reina de Mayo y Parrales, en los dos tratamientos de riego aplicados. La línea representa el mejor ajuste, %cobertura de suelo=0,0951GDA + 4,3069, R^2 = 0,9062. b: Relación entre Peso fresco de planta y los grados día acumulados en los dos cvs estudiados, Reina de Mayo y Parrales, en los dos tratamientos de riego aplicados. Cada punto es la media de tres datos. La línea representa el mejor ajuste, Peso fresco = 0,80748GDA, R^2= 0,8598. Cada punto es la media de tres datos.

La biomasa fresca se ajustó también a un modelo lineal con un coeficiente de determinación del 86%. Nuevamente, no se detectaron diferencias significativas entre variedades ni tratamientos de riego. Aunque el peso fresco es un parámetro destructivo, su comportamiento fue predecible, y el modelo obtenido fue: **Peso fresco = 0,8075 × GDA; R^2 = 0,8598** (Figura 1b).

El peso seco mostró un ajuste aún mejor que el peso fresco, a pesar de contar con un número menor de datos debido a fallos técnicos con la estufa de secado. La ecuación obtenida fue: **Peso seco = 0,030 × GDA; R² = 0,8923** (Figura 2a). Como en los casos anteriores, no se encontraron diferencias entre variedades ni tratamientos, y el modelo fue estadísticamente significativo.

En cambio, el número de hojas mostró diferencias entre variedades. La variedad 'Parrales' alcanzó un mayor número de hojas y tuvo una tasa de crecimiento superior a la variedad 'Reina de Mayo'. Las ecuaciones ajustadas fueron para el cv Parrales: Número de hojas = 0,0866 × GDA – 4,536; R² = 0,9519 y para el cv Reina de Mayo: Número de hojas = 0,0531 × GDA – 0,987; R² = 0,9541. Ambos modelos fueron altamente significativos y no se observaron diferencias por efecto del tratamiento de riego deficitario (Figura 2b).

La biomasa (fresca y seca) es comúnmente empleada en modelos de crecimiento por ser un buen indicador del desarrollo y del rendimiento en lechuga. En trabajos previos como el de Tarr et al. (2023), tanto la biomasa fresca como el número de hojas se modelizaron eficazmente en función de la temperatura y la radiación, aunque en condiciones de cultivo *indoor* y niveles bajos de irradiancia. En nuestro caso, la radiación fue elevada en ambos ensayos.

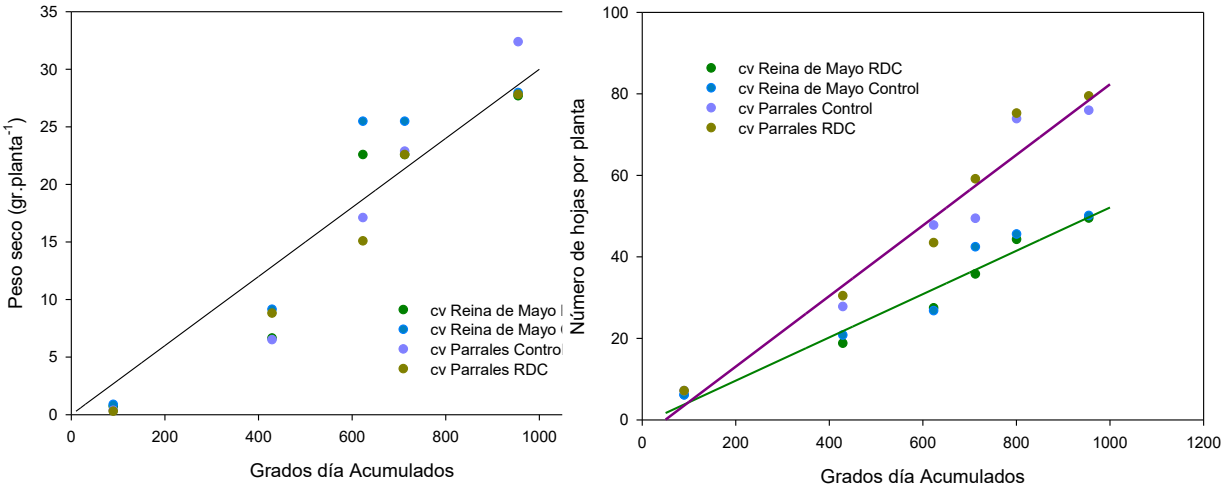


Figura 2, a: Relación entre peso seco y los grados día acumulados en los dos cvs estudiados, Reina de Mayo y Parrales, en los dos tratamientos de riego aplicados. La línea representa el mejor ajuste, Peso seco = 0.03GDA, R² = 0,8923. b: Relación entre número de hojas por planta y los grados día acumulados en los dos cvs estudiados, Reina de Mayo y Parrales, en los dos tratamientos de riego aplicados. Las líneas representan el mejor ajuste. Número de hojas en cv parrales = 0,0866GDA- 4.,536, R² = 0,9519; Número de hojas en cv Reina de mayo= 0,0531GDA – 0,987, R² = 0,9541. Cada punto es la media de tres datos.

3.2. Validación de los modelos con un caso real.

La validación de los modelos mediante un ensayo independiente realizado en Bioalverde (2024) mostró que no hubo diferencias significativas con el modelo de cobertura de suelo desarrollado previamente, incluso al aplicar diferentes variedades y tratamientos. El modelo se ajustó adecuadamente a los datos obtenidos en otoño, con un R^2 de 0,89, confirmando su utilidad para predecir el desarrollo del cultivo (Figura 3a). La ligera desviación al inicio del cultivo se corrigió conforme avanzó el ciclo. Este modelo, más sencillo que otros basados en radiación y temperatura, permite igualmente estimar la fecha de recolección en función de las temperaturas acumuladas.

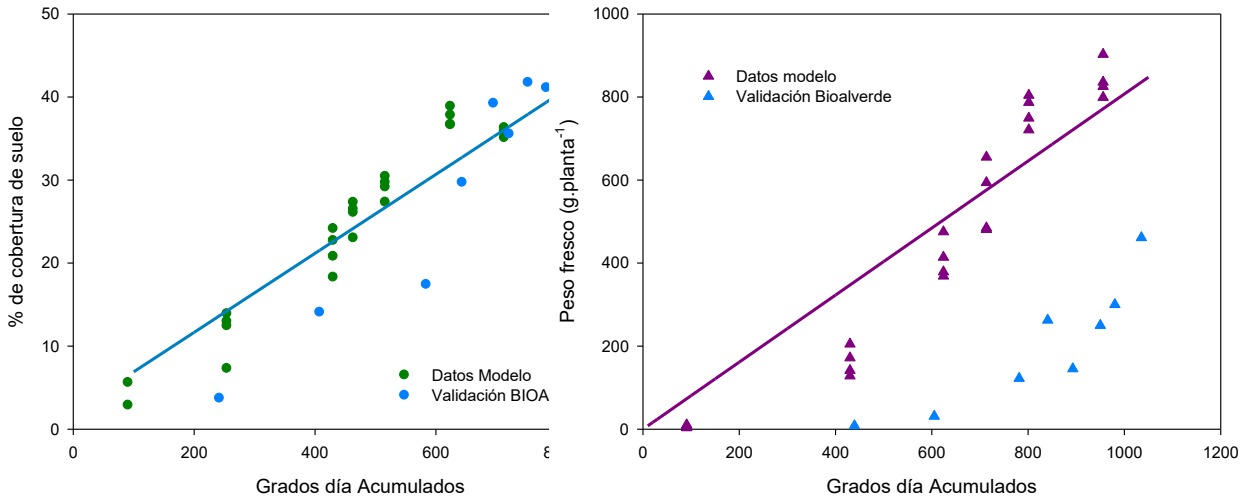


Figura 3, a: Relación entre Cobertura de suelo y los grados día acumulados en el modelo obtenido previamente, junto a los datos de cobertura medidoa en BIOALVERDE, en el cv VOLTRON RZ. La línea representa el ajuste del modelo, %cobertura de suelo=0,0951GDA + 4,3069, R^2 = 0,9062. b: Relación entre Peso fresco de planta y los grados día acumulados en el modelo obtenido previamente, junto a los datos de canopeo medido en BIOALVERDE, en el cv VOLTRON RZ. La línea representa el mejor ajuste, Peso fresco = 0,80748GDA, R^2= 0,8598. Cada punto es la media de tres datos.

El peso fresco de las lechugas del ensayo de Bioalverde mostró una tasa de crecimiento mucho menor, de manera que el modelo establecido en el ensayo inicial no sirvió para estimar el comportamiento del cultivo. A pesar de mostrar resultados comparables con trabajos previos [6], en los que el peso seco responde a temperatura y radiación, las diferencias en las condiciones de validación probablemente han sido muchas. Con mucha probabilidad el acolchado plástico y la fertiirrigación del primer ensayo explican un mayor crecimiento, al tiempo que las condiciones climáticas, 20 días de temperaturas y radiaciones elevadas, la variedad Voltron RZ mostro valores de biomasa fresca significativamente menores. Serían necesarios ensayos en las mismas condiciones para poder diferenciar el efecto varietal y el de las condiciones de cultivo.

El peso seco tuvo un comportamiento similar al peso fresco, pero las diferencias fueron menores. Los valores se ajustaron a una ecuación lineal diferente estadísticamente a las del modelo inicial. Podríamos decir que el modelo no consiguió una buena predicción de los valores de peso seco de la variedad Voltron Rz en el ensayo de Bioalverde.

En general la biomasa mostró una tasa de crecimiento más lenta al inicio del cultivo, coincidiendo con temperaturas más elevadas (máximas por encima de 30º) como son los habituales en la zona en los meses de septiembre y octubre. Y aumentaron en la segunda parte del cultivo con temperaturas algo más bajas en noviembre y diciembre (24ºC) más cercanas al óptimo del cultivo como se ha demostrado en trabajos anteriores la tasa de crecimiento relativo instantáneo de la lechuga es óptima con 25°C [7].

El número de hojas del ensayo de Bioalverde con la variedad Voltron Rz tuvo un comportamiento más parecido a la variedad Reina de Mayo, que a la variedad Parrales, a pesar de ser esta última del mismo tipo de lechugas (ambas del tipo Batavia de hoja suelta y rizada) (Figura 4). El ajuste de la variedad Voltron Rz. Mostro que la pendiente la pendiente no fue estadísticamente diferente del modelo de reina de mayo, pero si lo fue el término independiente. Mientras el análisis de las rectas con el modelo de la variedad parrales mostro diferencias tanto en la pendiente como en el término independiente. Estas diferencias en el número de hojas entre las variedades, indica que este parámetro puede ser útil para diferenciar el comportamiento de distintas variedades de lechuga. Este hallazgo es relevante para la selección de variedades en programas de mejora genética y manejo agronómico.

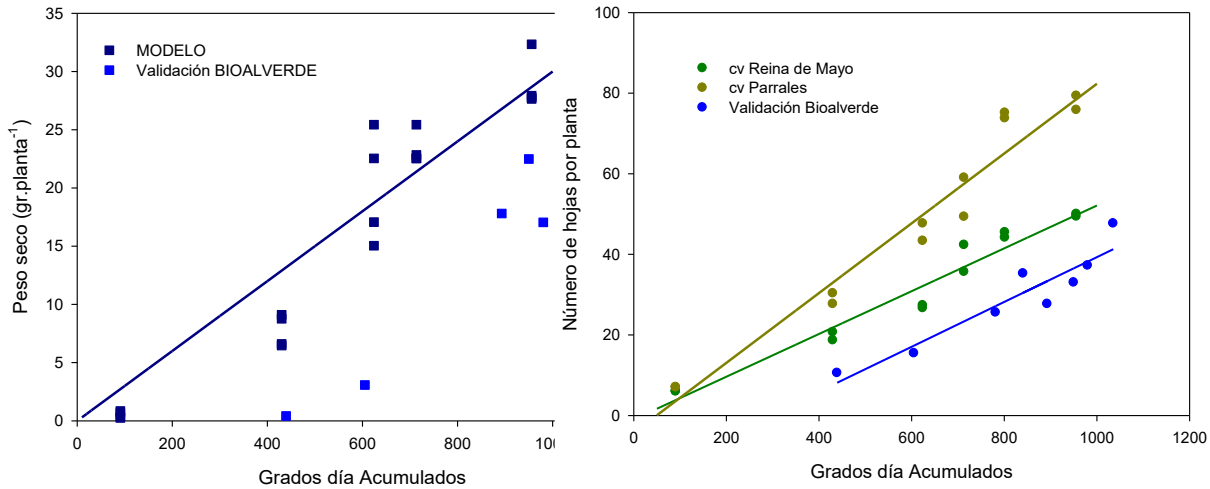


Figura 4.- a: Relación entre peso seco y los grados día acumulados en el modelo obtenido previamente, junto a los datos de canopeo medido en BIOALVERDE, en el cv VOLTRON RZ. La línea representa el mejor ajuste, Peso seco = 0.03GDA, R^2 = 0,8923. b: Relación entre número de hojas por planta y los grados día acumulados en el modelo obtenido previamente, junto a

los datos de canopeo medido en BIOALVERDE, en el cv VOLTRON RZ. Las líneas representan el mejor ajuste. Número de hojas en cv parrales = 0,0866GDA- 4.,536, R^2 = 0,9519; Número de hojas en cv Reina de mayo= 0,0531GDA – 0,987, R^2 = 0,9541. Cada punto es la media de tres datos.

La validación de los modelos en condiciones reales de cultivo confirma su aplicabilidad y robustez. No obstante, es necesario realizar ensayos adicionales para ajustar los modelos a diferentes condiciones de cultivo y variedades. La integración de datos climáticos, edáficos y de estado del cultivo, combinando información de sensores en campo con datos de imágenes satelitales e inteligencia artificial, puede mejorar aún más la precisión y eficiencia de los sistemas de riego automatizados.

4. Conclusiones

Los modelos de crecimiento desarrollados son adecuados para caracterizar el crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga en condiciones reales, facilitando la implementación de estrategias de riego, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia del uso del agua en la agricultura. La cobertura de suelo resultó ser un buen indicador del crecimiento del cultivo, el modelo desarrollado es útil en diferentes variedades y tratamientos de riego. Consideramos adecuado su uso para la herramienta aquaIA, en la que puede ser útil para estimar el coeficiente del cultivo y las necesidades de riego.

Funding:

Este trabajo ha sido financiado por los siguientes proyectos:

AquaIA - Sistema de programación de riego deficitario para cultivos, financiado por el Grupo Operativo de la Junta de Andalucía (Referencia: GOPG-SE-23-0011).

Producción sostenible de hortícolas basada en sistemas agrovoltaicos, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Referencia: PID2021-122772OB-I00) bajo el Plan Estatal 2021-2023 - Proyectos de Investigación Orientada.

Referencias

1. Ferreira, C. S., Soares, P. R., Guilherme, R., Vitali, G., Boulet, A., Harrison, M. T., ... & Ferreira, A. J. (2024). Sustainable water management in horticulture: Problems, premises, and promises. Horticulturae, 10(9), 951.
2. Dzalbs, A., Bimbere, M., Pubule, J., & Blumberga, D. (2023). Environmental Impact Decision Support Tools for Horticulture Farming: Evaluation of GHG Calculators. Agriculture, 13(12), 2213.
3. Udhayarasu E, Pradeepkumar M, Naveen Adithiya P , Santhosh S. (2023). Automated Irrigation System Based Upon Crops. International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 12, no. 11, 2023. 10.17577/IJERTV12IS110014
4. Tarr, S. T., Valle de Souza, S., & Lopez, R. G. (2023). Influence of day and night temperature and radiation intensity on growth, quality, and economics of indoor green butterhead and red oakleaf lettuce production. Sustainability, 15(1), 829.

5. Yörük, E., Duran, H., Eren, E., & Özer, H. (2021). Determination of growth models in organic lettuce cultivation. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 36(2), 276-281.
6. Carotti, L., Graamans, L., Puksic, F., Butturini, M., Meinen, E., Heuvelink, E., & Stanghellini, C. (2021). Plant factories are heating up: Hunting for the best combination of light intensity, air temperature and root-zone temperature in lettuce production. Frontiers in plant science, 11, 592171.
7. Wheeler, T. R., Hadley, P., Morison, J. I. L., & Ellis, R. H. (1993). Effects of temperature on the growth of lettuce (Lactuca sativa L.) and the implications for assessing the impacts of potential climate change. European Journal of Agronomy, 2(4), 305-311.

The role of Smartvitinet's Competence Centre in the development of the wine sector.

Maria da Graça Monteiro[1], Sofia Kalakou*[1] , Thanos Arvanitidis[2], Anna Palaiologk[2]

[1] Iscte Business School, Business Research Unit, University Institute of Lisbon, Avenida das Forças Armadas, 1649-026 Lisboa

[2] Future Needs Management Consulting Limited

* Correspondence: sofia.kalakou@iscte-iul.pt

Abstract: The Smartvitinet Project brings to the market a holistic plant protection system based on the use of unmanned aerial vehicles, new observation platforms, and new ready-to-use sensors. One of the most important facets of the project is the creation of a Competence Centre (CC) related to precision viticulture that aims to develop, centralize and manage specialist knowledge in a specific area, to help improve the skills of professionals in the wine sector, and to promote experimentation and collaboration between stakeholders. With the development of new technologies, such as drones, which seek to help increase the productivity and effectiveness of viticultural practices, while mitigating the negative impact of climate change, farmers need to be constantly adapting and learning. Thus, the competence centre, by providing training materials and resources with recommendations for best practices aimed at stakeholders, as well as a networking for them, begins to play an important role in local economic development. Optimizing the use of resources and improving production efficiency, by promoting innovation in viticulture, leads to an increase in the sector's competitiveness, as well as a reduction in the negative impact of viticulture on health and the risks of food and environmental pollution.

Keywords: Competence Centre; Smartvitinet; Drones; Viticulture; Precision viticulture; Precision technologies; Unmanned Aerial Vehicles

1. Introduction

Nowadays, winegrowers and agricultural workers face numerous challenges, including the rising demand for food products, the need to maintain high safety and quality standards, and the responsibility of protecting the environment, while dealing with climate change [1]. Since agriculture is the world's primary food source and the global population is expected to keep growing, it is important to recognize that the sector will remain the largest consumer of water and will lead to increased use of fertilizers and pesticides, significantly impacting the environment [1].

More specifically, the viticulture community needs to obtain necessary knowledge in dealing with problems in vineyard cultivation, such as Mildium, Oidium, “Esca”, Black rots, Vine moth, and a variety of others, which cause significant production losses [2]. However, the negative consequences, of the use of pesticides, for the

beneficial biodiversity of the vine, health problems for industry professionals, complications in the food chain, increased production costs for the farmers, deterioration in product quality, are not aligned with the UN Development Goal for sustainable agriculture or the EGD target of 25% of agricultural land under organic farming by 2030 [3]. Therefore, the promotion of the sustainable use of pesticides is one of the important actions being undertaken by the EU in support of the achievement of the UN 2030 Agenda for Sustainable Development.

Consequently, new technologies have been developed to help grape producers maintain efficient practices while adapting to climate change, minimizing environmental harm, and managing production costs. Precision agriculture has emerged as a key solution, improving processes, lowering production expenses, and reducing input waste, ultimately mitigating the environmental impact of agricultural practices [4]. One of the most powerful tools in precision viticulture is the use of remote sensing through its ability to provide a synoptic view of grapevine shape, size and vigour over entire vineyards, to detect various conditions and characteristics that may not be detected or take longer for the human eye to detect.

Sensors are now capable of delivering detailed data on soil conditions, nutrient levels, insights into fertilizer needs, water availability, and pest and diseases activity. Unmanned aerial vehicles (drones) equipped with imaging technology can monitor vineyards, capturing aerial images that help detect crop ripeness, identify potential issues, and offer early warnings of any deviations from expected growth rates or quality. This combination of sensors and aerial platforms are starting to become essential for decision support in viticulture processes enabling viticulturists to make more informed decisions and respond proactively to challenges in vineyard management. They can have a significant contribution especially in the processes of monitoring irrigation and controlling pests and diseases, with the use of multispectral, thermal cameras, RGB cameras, and a variety of others, incorporated in them [5].

1.1 Smartvitinet

SmartVitiNet is an initiative designed to develop, test, and commercialize a comprehensive plant health and protection system utilizing unmanned aerial vehicles, advanced observational platforms, and sensors. These and other technologies will be presented through a Competence Centre for Precision Viticulture developed by the project aiming to promote collaboration among key stakeholders to leverage their expertise, experience, and infrastructure for innovative advancements in the field.

The principal objective of SmartVitiNet is to facilitate data-driven and evidence-based decision-making in the wine industry by providing high-quality sector intelligence. To achieve this, the project is developing a pilot version of a Decision Support System for vineyard plant protection. This system incorporates drones, sensors, and advanced technologies, including multispectral cameras for vineyard disease detection, computer vision algorithms for image processing, and high-precision visual analytics for generating detailed vineyard maps.

By delivering a powerful tool for vineyard owners, SmartVitiNet aims to enhance vineyard management, improve production efficiency, and assist regulatory authorities at both local and national levels in formulating more accurate and practical guidelines for viticulture. A key focus of the project is to keep technology adoption costs as low as possible for users. To achieve this, open-source software and algorithms will be utilized, ensuring accessibility and flexibility for future technological advancements. The contribution of drones in viticulture processes is also being addressed.

1.2 Competence Centre

A Competence Centre for Precision Viticulture (CC) is being developed in the scope of the project, dedicated to improving the skills of professionals, promoting expert networks, and cultivating continuous knowledge exchange between academia, innovative small and medium-sized enterprises (SMEs), viticulture professionals, and regional authorities. In this way, it aims to boost the sector's competitiveness while aligning with EU environmental policies, minimizing health risks, and reducing the chances of food contamination.

The CC serves as an open-access platform, where anyone interested, can explore precision viticulture technologies developed within the project. Comprehensive training and support is provided, guaranteeing that users can effectively apply these innovations. Additionally, industry experts will offer consultancy services to both small and large viticulture enterprises, helping them integrate precision viticulture techniques into their operations. More specifically existing training programs developed by the project consortium will be combined with new advancements to create a series of practical seminars. A key objective of the initiative is to rigorously test this model, with the long-term goal of maintaining and expanding the centre’s operations to other agricultural sectors in the future.

In order to understand the need to include drones in grape growing processes, and to support this competence centre with more resources, the processes were designed and represented through flowcharts. The flowcharts depict the various stages of the disease prevention and curative treatment processes, in order to

demonstrate where drones can be inserted to optimize the steps of each process providing farmers with information that helps them make better decisions about these technologies.

SmartVitiNet and its Competence Centre are committed to cultivating the next generation of leaders in the wine industry. The goal is to equip them with the expertise needed to adopt research and development innovations, drive technological advancements, and establish strong professional networks that will support their future contributions to the sector. European winemakers who integrate SmartVitiNet solutions into their production processes can gain a significant competitive edge, positioning themselves at the forefront of innovation in the industry. Boosting competitiveness goes beyond simply cutting costs, it involves maximizing all available resources to identify and seize new opportunities.

2. Materials and Methods

In order to develop the competence centre, an overview of competence centres in the same field was conducted, a needs analysis of producers also took place, then vineyard visits were conducted with project partners, bibliographical research, interviews, and, finally, the training material containing slides and videos, was developed.

2.1 Needs analysis

As a first step, a needs analysis through 6 interviews took place and revealed critical user needs for the SmartVitiNet project, including early detection and timely alerts for plant diseases (downy and powdery mildew), water stress during harvest, and insect infestations (grapevine moth, Lobesia Botrana). The interviewees highlighted the necessity of a system that leverages historical observational data to develop customised risk indicators, providing tailored recommendations for biodynamic treatments to manage climate-related risks. Automation in preventive treatments, soil preparation, optimal harvest timing, and predictive insights into emerging vineyard challenges were also emphasised. Additionally, the need for an intuitive platform offering real-time and historical environmental data, alongside easy-to-use data extraction tools such as spreadsheets or dashboards, was underscored.

Recognising these diverse needs, the SmartVitiNet project addresses technical requirements through the scaling-up, piloting, and commercialisation of an integrated phytosanitary and plant protection system that incorporates unmanned aerial vehicles, novel observational platforms, and advanced sensor technologies. Equally significant is the establishment of a Competence Centre dedicated to education, training, consulting, and knowledge dissemination. This centre facilitates

targeted training programmes on precision agriculture technologies, offer expert consultancy services, and serve as a hub for sharing insights into emerging technologies and funding opportunities in precision viticulture and related agricultural domains. Through these efforts, the Competence Centre aims to promote skill development, encourage effective collaboration across academia, industry, government, and civil society, and support innovation and leadership within the viticulture sector.

2.2 Visits to partner vineyards

After the exploration of the needs, visits to 3 vineyards in Portugal were conducted for on-site research. The deployment of a drone was reported to later demonstrate how a non-familiar producer could use this technology in his/her vineyards. Specifically, two researchers from recorded the material for the CC with the use of one of the project's drones, the DJI Mavic 3M. A visit was made to each farm where data was collected to test the drones' functionalities in different productions, with different climates, and images were also collected as material to support the competence centre's training material.

2.2 Interviews

To demonstrate the potential impact of drones on production and the potential value of the Competence Centre to the community of producers, the processes that can be affected by drones were explored. Specifically, interviews were carried out with some farmer who produce grapes for wine making. The producers were Portuguese winegrowers working in vineyards of between 10 and 50 hectares, producing a variety of grape varieties from different regions of Portugal. The interviews consisted of 4 different blocks. The first one consisted of questions regarding the profile of the winegrower, the second one was related to the process of monitoring irrigation in vineyards and how the drone could be inserted into irrigation monitoring, optimizing and eliminating certain costs involved in the stages of the process. Finally, the third one was related to the process of pest and disease control in vineyards and how the drone could be inserted into pest and disease control, optimizing and eliminating certain costs involved in the stages of the process.

2.4 Development of training material (slides and videos)

A literature review was carried out about the challenges facing farmers today, the technologies they need that have emerged, remote sensing, and the use of drones, their benefits and challenges. Tools such as google scholar, scopus and the web of science were used to collect information from various papers. Based on this literature review, slides were created using PowerPoint office tools, as material to

include in the competence centre. Slides and slideshows were also generated with the help of the footage taken during visits to the farms and the information acquired during the drone use courses with the help of PowerPoint office, in order to provide resources for the competence centre's training material.

3. Results

3.1 Competence Centre design

A Centre of Competence (CC) is defined as "structured, long-term research and innovation (R&I) collaboration in strategically important areas between academia and industry with frequent interactions with the public sector. A CC focuses on strategic research agendas, supports strong interactions between science and industry, and provides truly collaborative research with a medium to long-term perspective" [6]. The European Commission (EC) defines a Competence Centre (CC) as a specialized platform designed to drive excellence, innovation, and knowledge exchange within a particular industry or field.

These centres act as key systems for research, expertise development, and skill-building, joining businesses, academic institutions, and public organizations. By supporting strategic collaborations and aggregating resources, competence centres play a crucial role in advancing research, through talent, skills, and competence development, facilitating technology transfer, and promoting best practices across the European Union.

Considering the purpose of the project and the nature of a competence centre, the SmartVitinet`s CC aims to provide a training experience that is up to date with the needs of the viticulture industry. Therefore, key objectives have been identified:

- Raise Awareness on the use of drones in viticulture
- Raise awareness about other data sources and information types that can contribute to innovation in viticulture (e.g. satellite data)
- Equip viticulturers with the knowledge and skills necessary to fly the drone(s) under the regulatory landscape
    - Practical technological aspects on how to operate the device(s)
    - Practical advice on how to manage other drone-related aspects
- Train viticulture professionals to use the Decision Support System (DSS) provided by the SmartVitiNet platform
    - How farmers can learn to draw insights from the data that will be available in the portal
- Build a European Community of Viticulturers that employ or want to employ drones in their activities

In order to meet these objectives, a structure for the platform was thought out in detail, with the aim of serving the purpose in the best possible way. It comprises of five areas:

- **The Home page-** The homepage serves as the main entry point to the community, welcoming visitors and guiding them to explore different aspects of the project or topics of interest. It highlights key features of the Competence Centre and provides options for users to sign up or log in.
- **Welcome page**- Once signed in, users land on a personalized dashboard displaying the latest updates, including recent forum discussions, newly joined organizations, library additions, and other relevant news about the Competence Centre.
- **The training page**- This is the central hub of the Competence Centre, where users can access a variety of training courses and instructional videos. It offers a structured learning experience covering different aspects of smart agriculture.
- **The library page**- This section houses all documents referenced in the training area, along with additional relevant materials from external sources. It serves as a comprehensive knowledge repository for users seeking in-depth information.
- **The Network/community page**- This feature enables users to connect with others by searching through a database using filters such as skills, location, sector, or organization type. Future enhancements will include an advanced search function that categorizes technologies and expertise for a more refined user experience.

3.2 Training material

The training material offered by the Competence Centre is based on the needs analysis that was initially conducted. To respond to what the market requires, it is organized into 5 modules so that it is easy and simple to access, so that winegrowers know exactly what training they are offered in order to be able to comprehend the SmartVitiNet technologies and be able to deploy them for their operations. The training material is organised into 5 modules that are described below:

- Module 1: provides information about common problems that viticulture faces and how smart technologies can help tackle these problems.
- Module 2: offers a comprehensive overview about cameras, lenses and sensors and their applications.
- Module 3: delivers a practical guide on the use of drone(s) in Viticulture
- Module 4: gives information about data processing and how to use, utilise, and make the most out of the portal.

- Module 5: explores various financing opportunities available for smart agriculture projects.

3.3 Viticulture process design

For the demonstration of the potential of drones in viticulture, a process analysis approach was adopted. Based on the information obtained from 6 interviews with winegrowers, the preventive treatment processes were designed, as well as the detection and curative treatment process for the mildew and oidium pests. As more interviews were carried out, the flowcharts came close to covering all the possible ways of controlling diseases.

4. Discussion

For the preventive disease treatment process, it was found that determinants aspects are the location of the vineyard, the level of humidity it characterises it, whether it is an organic production or not, the monitoring process of the field and whether there is a preventing process established or not. For the disease detection process, it is important to distinguish between producers who use weather stations and those who do not. If a station is available, the conditions of rain and humidity are controlled along with the temperature. While doing this analysis, if they detect disease and the plant is not at an advanced phenological stage, a preventive treatment is going to be carried out, if the plant is in an advanced phenological stage a curative treatment is going to be carried out.

Based on the process analysis results, it was possible to understand which stages of the processes could be changed to optimize the processes with the help of drones. For example, we were able to conclude that the stages of the process in which the vineyard is analysed to detect the presence of disease is one of the stages that can easily be replaced by drones, since they detect the condition of the plant more quickly and in more detail than the human eye, using sensors. Sometimes, during this stage of the process, mistakes can be made and a plant with traces of disease can escape, in this case, the drone would work more effectively.

Conducting the process analyse helps us to reach more and more winegrowers and their practices, to put ourselves in their shoes, to have more contact and knowledge about their daily lives, so that we can develop better and more accurate work. Interviews have also shown that winegrowers are very interested in precision technologies, they want to know more about what is available and how it can help them in their day-to-day work.

5. Conclusions

The structure of the Competence Centre is designed to provide the best resources for winegrowers who want to get involved in precision agriculture. A platform made easy and quick to access, breaking down barriers to the transmission of information about drones and their uses. Optimizing the use of resources and improving production efficiency, by promoting innovation in viticulture leads to an increase in the sector's competitiveness, as well as a reduction in the negative impact of viticulture on health and the risks of food and environmental pollution. The development of the CC is expected to lead to greater adherence to these technologies by workers in the sector, a higher percentage of informed people and greater interest in expanding this area of research.

To conclude, the function of a Competence Centre for smart viticulture is significant for the response of producers to climate changes. Considering that EU wine regions exhibit diverse precision viticulture needs and varying technology adoption levels [7], with a focus on efficient water management and disease control in Southern European vineyards [7], producers could benefit from the knowledge transfer and the facilitation of the deployment of promising technologies that can turn production more proactive and more efficient.

References

1. *Rejeb, A., Abdollahi, A., Rejeb, K., & Treiblmaier, H. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. Computers and Electronics in Agriculture.*
2. *Grape Grower's Handbook: A Guide to Viticulture for Wine Production. (n.d.). https://www.wine-grape-growing.com/*
3. *EUR-LEX - 52022PC0304 - EN - EUR-LEX. (n.d.). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52022PC0304*
4. *Sassu, A.; Gambella, F.; Ghiani, L.; Mercenaro, L.; Caria, M.; Pazzona, A.L. Advances in Unmanned Aerial System Remote Sensing for Precision Viticulture. Sensors 2021, 21, 956.*
5. *Tardaguila, J., Stoll, M., Gutiérrez, S., Proffitt, T., & Diagoa, P. (2021). Smart applications and digital technologies in viticulture: A review. Smart Agricultural Technology.*
6. *Future Competence Centre Programmes Report of the TAFTIE Task Force on Competence Centre Programmes CompAct. 2016.*
7. *Z. Szira, É. Gregus-Greutter, Z. Greutter, and E. Varga, "Regulation of Precision Farming in EU Countries," EU agrarian Law, vol. 13, no. 2, pp. 10–16, Dec. 2024, doi: 10.2478/eual-2024-0007*.

Comparativa de la entrada en producción de 4 variedades de manzanos en Valladolid

Isabel González-Barragán[1*], Dunia Virto González[1] e Isabel Mateos Moreno[1]

INEA. Universidad Pontificia de Comillas; igbarragan@comillas.edu, dvirto@comillas.edu, imateos@comillas.edu

[1] Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola INEA. Universidad Pontificia de Comillas.

* igbarragan@comillas.edu

Resumen: El presente trabajo evalúa la evolución de la entrada en producción de cuatro variedades de manzano (Golden Delicious, Royal Gala, Fuji y Reineta Blanca). El objetivo fue determinar diferencias significativas en la producción anual por variedad, edad y su interacción, con el fin de orientar decisiones agronómicas en nuevas plantaciones. El ensayo se llevó a cabo con un diseño experimental de parcelas divididas con cuatro repeticiones (bloques). Cada bloque incluía cuatro parcelas (una por variedad), con tres árboles por parcela. En cada parcela se evaluaron tres edades del árbol (4, 5 y 6 años). Se registró la producción anual total (kg/árbol) y se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) seguido de la prueba de comparación de medias de Tukey (nivel de significación $\alpha = 0,05$). Los resultados mostraron que Golden Delicious fue la variedad con mayor producción media anual, seguida de Royal Gala. Fuji y Reineta presentaron la producción más baja. En cuanto a la edad, se observó un incremento paulatino entre los 4 y 6 años. Los resultados confirman la importancia de considerar la variedad en la planificación de plantaciones. Este estudio proporciona información práctica para productores que buscan optimizar la rentabilidad del cultivo en regiones de condiciones similares.

Keywords: manzano; agricultura ecológica; variedad; juvenilidad; Golden; Royal Gala; Fuji, Reineta.

1. Introducción

En las últimas décadas, la agricultura ecológica ha ganado protagonismo como modelo productivo más respetuoso con el medio ambiente y más alineado con las demandas de consumo sostenible [1]. En este contexto, surge la necesidad de diversificar los cultivos tradicionales mediante la introducción de especies frutales adaptadas a las condiciones agroclimáticas locales, que permitan obtener producciones viables sin recurrir a la química de síntesis.

El manzano (*Malus domestica*) es una de las especies frutales más cultivadas del mundo, y su adaptación a distintos climas ha sido ampliamente documentada [2]. Sin embargo, su presencia en sistemas de producción ecológica en zonas del interior

peninsular es aún limitada, en parte por la escasez de estudios que evalúen su comportamiento productivo en estas condiciones. La entrada en producción, la regularidad de cosechas y la respuesta varietal al entorno son factores determinantes para su éxito comercial [3].

La fase juvenil del manzano puede durar varios años, dependiendo de factores genéticos, ambientales y del manejo agronómico [4]. Superado este periodo, es crucial analizar cómo se comportan las distintas variedades a lo largo del tiempo para identificar aquellas con mejor potencial productivo y estabilidad. Estudios previos han mostrado diferencias importantes entre variedades en cuanto a precocidad, adaptación al estrés hídrico y rendimiento en ecológico [5,6].

Con este ensayo se pretende aportar conocimiento útil para los productores ecológicos de la región de Castilla y León, donde el clima mediterráneo continental presenta desafíos particulares como veranos secos, inviernos fríos y oscilaciones térmicas marcadas. El objetivo principal fue evaluar la evolución de la producción de cuatro variedades de manzano —Golden, Royal Gala, Fuji y Reineta— en los 3 años inmediatamente posteriores a la fase juvenil, en un diseño experimental representativo y bajo manejo ecológico.

Las variedades ensayadas son Golden, Royal Gala, Fuji y Reineta Blanca. En la siguiente tabla se muestra a modo de resumen una comparativa de algunos de los aspectos más importantes entre ellas:

Variedad	**Golden Delicious**	**Royal Gala**	**Fuji**	**Reineta**
Origen	EE.UU., siglo XIX	Nueva Zelanda, años 1930	Japón, años 1930	Europa Occidental (Francia)
Entrada en producción	Temprana (2-3 años)	Temprana (2-3 años)	Media (3-4 años)	Tardía (4-5 años)
Fenología (floración)	Media	Temprana-media	Tardía	Precoz
Susceptibilidad a heladas	Moderada	Alta	Media	Alta
Horas frío (estimadas)	900–1.100	800–1.000	600–800	1.000–1.200
Integral térmica aproximada (°C base 10º)	900–1.200	1.200	1.000–1.200	1.200–1.400
Época de cosecha	Finales de septiembre - octubre	Finales de agosto - septiembre	Finales de octubre - noviembre	Octubre
Capacidad de conservación	Muy buena (larga duración)	Buena	Excelente	Media

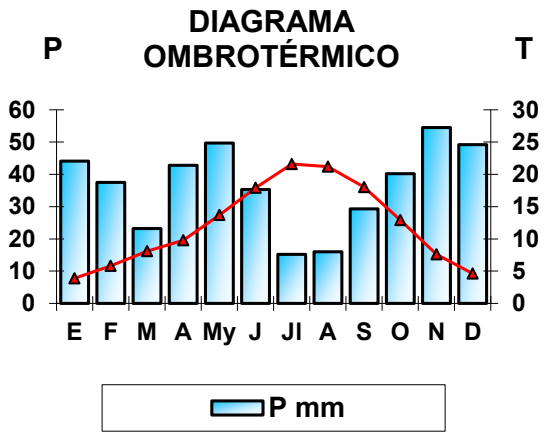
2. Material y Métodos

Localización y características edafoclimáticas

El ensayo se llevó a cabo en la finca experimental de las escuela de Ingeniería Agrícola INEA (Universidad Pontificia de Comillas), situada en Valladolid (España), en un entorno gestionado bajo agricultura ecológica, con las siguientes coordenadas: 41,6064024 ; -4,7958350. Altitud media: 684m sobre el nivel del mar.

El ensayo se encuentra a orillas del río Pisuerga bajo un umbráculo.

El clima es mediterráneo continental, con precipitaciones anuales de 400–500 mm, veranos secos, inviernos fríos y gran oscilación térmica, caracterizado por el siguiente diagrama ombrotérmico:



En cuanto al suelo, sus características físico químicas, corresponden a las siguientes.

Textura	Franco-arenosa
Arena	65%
Limo	27%
Arcilla	7%
Ph (extrac. 1:5 agua)	8,10
Conductividad eléctrica (extrac. 1:5 agua)	0,18 mmhos/cm
Materia orgánica	1,39%
Carbonatos	5,30%
Relación C/N	8,80
Fósforo	81,8 mg/kg de suelo
Sodio de cambio	3mg/kg de suelo
Potasio de cambio	250 mg/kg de suelo
Calcio de cambio	2830 mg/kg de suelo
Magnesio de cambio	102 mg/kg de suelo

La plantación y el ensayo

En enero de 2017 se plantaron 180 manzanos de cuatro variedades: Golden, Royal Gala, Fuji y Reineta Blanca (45 árboles por variedad), con manejo ecológico, riego localizado, malla antihierba en las filas y cubierta vegetal espontánea en las calles, controlada mediante siegas. En las filas de plantación, intercalado con los árboles, se disponen aromáticas como hospedadoras de fauna auxiliar.

El diseño experimental del ensayo consiste en un split-plot con cuatro repeticiones, siendo el factor principal la variedad y el subfactor la edad del árbol. El ensayo estuvo compuesto por 16 parcelas (unidades experimentales) formadas por 3 árboles cada una, divididas en cuatro bloques (I, II, III y IV), siendo cada uno de los cuales una repetición. En cada bloque están presentes las 4 variedades a estudiar: Golden, Royal Gala, Fuji y Reineta, y dentro de cada variedad se estudiaron 3 edades del árbol: 4, 5 y 6 años.

En cuanto a la edad, los árboles fueron plantados en 2017. Este estudio comienza una vez superado el periodo de juventud (desde qué el árbol es plantado hasta que empieza a dar las primeras flores) de las especies más precoces. Este estudio presenta los resultados de las cosechas de 2021, 2022 y 2023. Es decir, las producciones de las diferentes variedades con 4, 5 y 6 años de antigüedad o de edad.

Muestreos

Se recogió la cosecha de cada árbol atendiendo al análisis visual de los frutos según el cambio de color en la maduración y características organolépticas. Al ser una producción ecológica orientada al comercio de proximidad, la recolección se realizó al inicio de la madurez gustativa. Siendo por ello necesario cosechar en diferentes momentos. Se realizó el mismo muestreo para la cosecha del 2021, 2022 y 2023 y poder estudiar así la evolución de la entrada en producción.

Análisis estadístico

Los datos de producción total anual de manzanas (kg/árbol) fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) Para evaluar:

-El efecto de la variedad.

-El efecto de la edad del árbol.

-La interacción entre ambos factores (variedad × edad).

Posteriormente, se aplicó una comparación de medias mediante el test de Tukey (nivel de significación $\alpha = 0,05$) para identificar grupos homogéneos dentro de cada factor y sus combinaciones.

Los resultados se visualizarán mediante gráficos de barras con letras superpuestas, que indican diferencias significativas entre grupos.

3. Resultados

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre variedades, edades y su interacción. Golden y Royal Gala destacaron por su mayor producción media, especialmente a los seis años. Reineta y Fuji tuvieron comportamientos más irregulares.

Como puede verse en la Figura 1, en las tres anualidades estudiadas, la cosecha de Royal Gala comenzó en agosto, incluso en la tercera anualidad (6 años de edad de la plantación, 3er año de producción) se adelantó a junio. La cosecha de Golden comenzó en septiembre y Fuji en octubre. La variedad Reineta comenzó su producción un año más tarde que el resto, madurando, al igual que Fuji, en octubre.

		Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2021	Golden							
	RoyalGala							
	Fuji							
	Reineta							
2022	Golden							
	RoyalGala							
	Fuji							
	Reineta							
2023	Golden							
	RoyalGala							
	Fuji							
	Reineta							

Figura 1. Periodos de cosecha de cada variedad en cada anualidad de estudio.

3.1. Producción media por variedad

Como puede observarse en la Figura 2, Golden fue la variedad más productiva en estas primeras etapas del cultivo. Royal Gala, con un periodo de maduración (Figura 1) más amplio que Golden, mostró rendimientos significativamente más bajos.

Reineta y Fuji, aunque diferenciadas en otros aspectos agronómicos y fenológicos, presentan un comportamiento productivo similar en este ensayo.

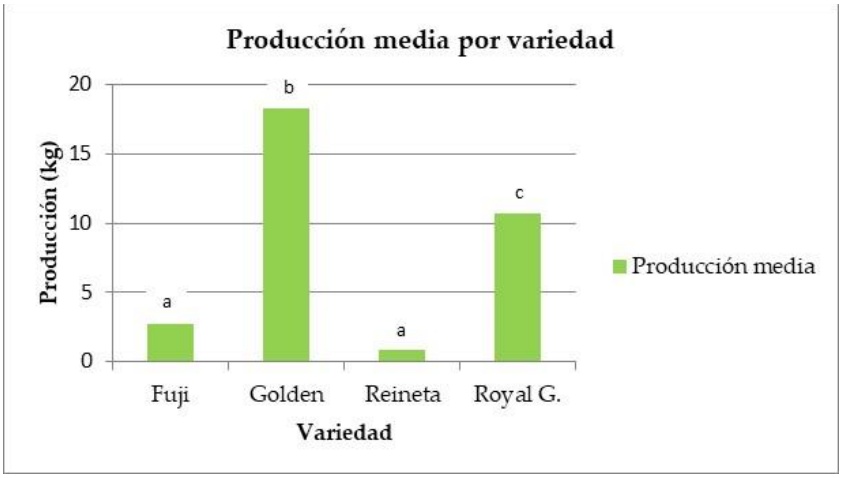


Figura 2. Comparación entre variedades. Distinta letra entre variedades quiere decir que son significativamente diferentes para $\alpha < 0,05$ (Tukey).

3.2. Producción media por edad

Al evaluar si la edad del manzano (4, 5 o 6 años) influye significativamente en la producción anual media por árbol, los resultados (Figura 3) reflejan el patrón esperado en frutales de pepita: a medida que el árbol supera la fase juvenil, la producción aumenta significativamente. Sin embargo, este aspecto es interesante estudiarlo dentro de cada variedad (Figura 5).

La producción se incrementa claramente entre los 5 y 6 años, será interesante observar en un futuro en que año tiende a estabilizarse, indicando que el árbol ha alcanzado su fase de plena producción.

Este comportamiento es coherente con lo observado en variedades como Golden y Fuji, cuyos patrones de entrada en producción y desarrollo se analizaron previamente.

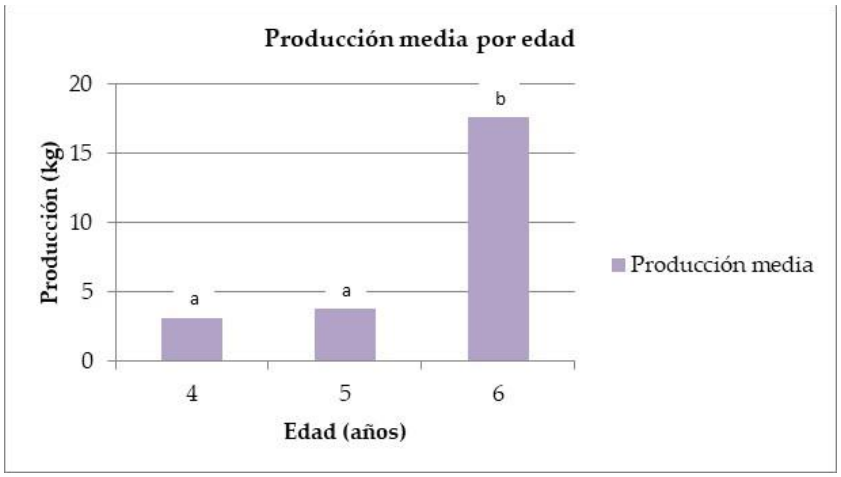


Figura 3. Comparación entre edades. Distinta letra entre las edades quiere decir que son significativamente diferentes para $\alpha < 0,05$ (Tukey).

3.3. Producción media para interacción variedad x edad

La variedad Golden (Figura 4) mostró una clara progresión en la producción con la edad, siendo significativamente superior al resto de variedades en todas las edades o anualidades estudiadas.

Royal Gala incrementó su producción de forma consistente entre los 4 y 6 años, pero sin alcanzar a las producciones de Golden.

Fuji y Reineta, incluso a los 6 años, tienen producciones bastante inferiores a Golden y Royal Gala. Será interesante estudiar su evolución y topes de producción cuando alcancen la plena producción.

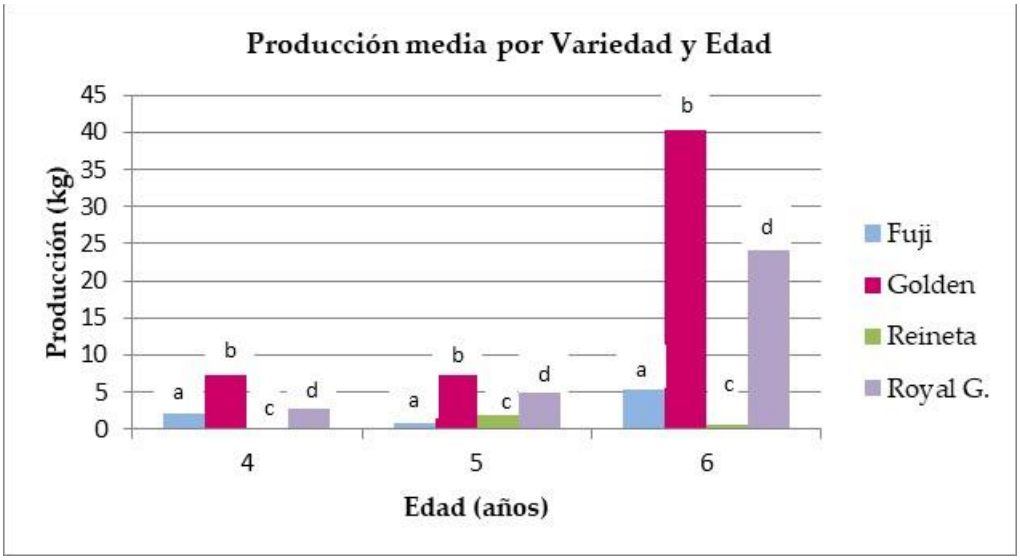


Figura 4. Interacción variedad x edad. Distinta letra entre las variedades dentro de cada grupo de edad quiere decir que existe diferencia significativa entre las variedades para $\alpha < 0,05$ (Tukey).

3.4. Producción media para interacción edad x variedad

En la Figura 5 puede verse que, a los 4 años Fuji, Golden y Royal Gala comenzaron su primera cosecha con escasa producción, destacando Golden (Figura 4). En estas 3 variedades se observa un claro incremento de la producción con los años, cosa que no ocurre con Reineta. Resulta llamativo como la producción de la variedad Golden entre el año 4 y 5 no presenta diferencias significativas incrementando notablemente en el año 6. En el caso de la variedad Reineta, a una entrada en producción más tardía se sumó una escasa en los años consecutivos.

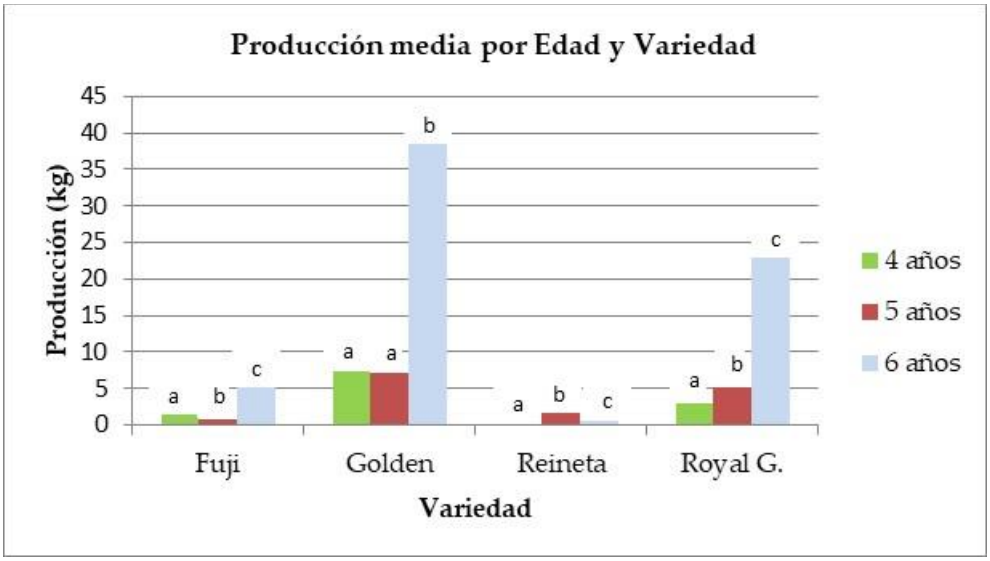


Figura 5. Interacción edad x variedad. Distinta letra entre las edades dentro de cada grupo de variedad quiere decir que existe diferencia significativa entre las edades para $\alpha < 0,05$ (Tukey).

La interacción Edad × Variedad pone de manifiesto que la respuesta productiva de cada variedad depende claramente de la edad del árbol. Golden es la variedad más productiva en todas las edades, especialmente a partir del quinto año. Royal Gala, aunque algo más limitada a edades tempranas, alcanza un rendimiento comparable a Golden a los 6 años. Fuji presenta una evolución lenta y mantiene niveles bajos de producción incluso en edad avanzada. Reineta confirma su carácter tardío y más rústico.

4. Discusión

Los resultados reflejan una clara influencia de la variedad y la edad del árbol sobre la producción. Golden y Royal Gala demostraron ser las más precoces para cultivos ecológicos en condiciones mediterráneas continentales, mientras que Reineta mostró un mayor retraso productivo.

Golden se muestra como una variedad precoz, vigorosa y de elevada producción en condiciones favorables. Por el contrario, Fuji y Reineta presentan las producciones más bajas, lo cual puede estar relacionado con su entrada en producción más lenta y su posible menor adaptación a las condiciones locales del ensayo. Eso habrá que valorarlo en años posteriores.

La interacción entre variedad y edad reveló comportamientos diferenciales importantes. Golden y Royal Gala alcanzaron sus mayores niveles de producción a los 6 años, superando claramente a las demás combinaciones. Fuji y Reineta, incluso a los 6 años, mantuvieron una producción significativamente inferior.

Finalmente, el análisis cruzado entre edad y variedad refuerza la idea de que Golden es la variedad con mejor comportamiento productivo en todas las edades, seguida de Royal Gala, que mejora sustancialmente a partir del quinto año. Estos resultados son especialmente útiles para orientar decisiones agronómicas en plantaciones nuevas, donde el tiempo de retorno de la inversión es un factor crítico.

En conjunto, los resultados obtenidos aportan información valiosa para la selección varietal y la planificación del manejo de las plantaciones de manzano y aportan datos empíricos relevantes para productores locales. De esta forma contribuyen a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del cultivo en regiones con características similares a las del ensayo.

El incremento de producción a partir del quinto año coincide con la superación del periodo juvenil, como han señalado otros autores [1,2]. La interacción significativa

entre edad y variedad refuerza la necesidad de estudios que consideren ambas variables de forma conjunta.

Bibliografía

1. Faust, M. (2011). Physiology of Temperate Zone Fruit Trees. John Wiley & Sons.
2. Webster, A.D. (1995). Rootstock and interstock effects on deciduous fruit tree vigour, precocity, and yield productivity. Acta Horticulturae, 658, 29–45.
3. Iglesias, I., & Echeverría, G. (2009). Differential effect of cultivar and harvest date on fruit quality of apples grown under organic and conventional production systems. Scientia Horticulturae, 123(2), 156–163.
4. Campoy, J.A. et al. (2011). The fulfillment of chilling requirements and the adaptation of temperate fruit trees to Mediterranean areas. Agricultural and Forest Meteorology, 157, 11–19.
5. Sansavini, S. et al. (2004). Apple fruit quality: overview on pre- and postharvest factors. Acta Horticulturae, 636, 705–713.
6. Weibel, F.P. et al. (2004). Sensory and chemical quality of apples under organic and integrated production. ScienceDirect Organic Agriculture.

PARTE 2

AUTOMAÇÃO E DIGITALIZAÇÃO

AUTOMATIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN

Índice

Manipulación mediante una garra robot de productos agrícolas delicados de alto valor añadido 185

Monitorización de viñedos mediante un robot terrestre autónomo con imagen multiespectral, LiDAR y comunicación 5G para edge computing 191

Use of autonomous vehicles to control agricultural losses caused by predatory foraging birds 200

Aplicación de algoritmos ISAR para la detección de yesca en vid 205

Monitorización de la recolección manual del granado mediante detección de movimiento 211

Manipulación mediante una garra robot de productos agrícolas delicados de alto valor añadido

Pablo González-Planells[1], David Calé-Cristóbal[1], Carlos Blanes[2] y Coral Ortiz[1,*]

[1] Rural and Agri-Food Engineering Department, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain 1; pabgonpl@upvnet.upv.es

[2] Instituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Edificio 8G, Acceso D, 1a Planta, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; carblac1@ai2.upv.es

* Correspondencia: cortiz@dmta.upv.es

Resumen: La manipulación mecanizada y automatizada de productos agrícolas frescos puede ocasionar la disminución de la calidad por daños durante estas operaciones. Por otro lado, la demanda de los consumidores de productos de alta calidad y con excelente apariencia externa se ha ido incrementando. Se hace necesario implementar sistemas de calibrado por imagen cada vez más precisos para determinar pequeños defectos externos difíciles de apreciar a simple vista en las operaciones de tría. El objetivo del presente trabajo fue la determinación mediante análisis de imagen de ligeros defectos externos en productos agrícolas de alto valor añadido. Dos lotes de 20 piezas de caqui y 20 piezas de champiñón fueron manipulados de forma automática, mediante una garra específicamente diseñada para la manipulación de productos agrícolas delicados (www.greenvision.com). Las piezas fueron analizadas mediante un prototipo de análisis de imagen diseñado para determinar ligeros defectos en productos agrícolas. El dispositivo contaba con dos cámaras que proporciona imágenes en los espectros visible, infrarrojo cercano y ultravioleta. Cada pieza era evaluada por cuatro caras diferentes. La superficie de daño ligero fue marcada y medida mediante el programa imageJ y relacionada con la superficie de daño medida mediante un pie de rey. Los resultados mostraron correlaciones significativas entre la superficie de daño medida manualmente y mediante análisis de las imágenes. Los modelos obtenidos servirán para entrenar el sistema automático de visión de un calibrador óptico.

Keywords: garra robot; alto valor añadido; daño; champiñón; aguacate; caqui; manipulación delicada

1. Introducción

En la agricultura moderna, los cultivos de alto valor añadido desempeñan un papel esencial en el crecimiento y la rentabilidad de la producción agrícola [1]. Los productos hortofrutícolas frescos son susceptibles de sufrir daños durante las operaciones de manipulación en cosecha y poscosecha [2]. Las fuerzas estáticas y dinámicas generadas durante las operaciones de manipulación hacen que los

productos hortofrutícolas frescos sean propensos a sufrir daños mecánicos [3]. El daño mecánico es la deformación plástica, ruptura superficial y/o destrucción del tejido vegetal. En las últimas décadas, se ha investigado la automatización de la recolección de productos hortofrutícolas frescos mediante diversos métodos, con el objetivo de reducir costes y disminuir la dependencia de la mano de obra disponible. Se han propuesto distintos modelos de herramienta final de los equipos automáticos o robots para el agarre de la pieza como copas de succión o dedos plásticos [4]. Para reducir el riesgo de daño y realizar un trato cuidadoso al producto se pueden emplear garras robóticas suaves ("soft grippers"), utilizados en robótica para manipular objetos delicados y de formas irregulares sin dañarlos [5-6]

En el presente trabajo tiene como objetivo analizar el trabajo de una garra robot neumática diseñada específicamente para la manipulación de productos agrícolas delicados, evaluando los daños producidos en el agarre de tres productos hortofrutícolas frescos de alto valor añadido, caqui, champiñón blanco y aguacate.

2. Materiales & Métodos

Material vegetal

Todo el material, de origen español, fue obtenido en el mercado mayorista "Mercovasa" (El Puig, Valencia) y seleccionado cuidadosamente para asegurar la ausencia de daños físicos, infecciones, enfermedades y para garantizar uniformidad en tamaño y color, logrando así un material lo más homogéneo posible. Una vez adquirido el producto, se almacenaron en cámara frigorífica durante 24horas en unas condiciones de 6°C y 85 % de humedad relativa.

- Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*), calibre grande (Categoría I) y en estado cerrado y sin cortar el tallo (Pie tierra).
- Caqui (Diopyros kaki), variedad 'Rojo brillante', con tratamiento de CO2 previo para eliminar la astringencia. Categoría I tamaño grande.
- Aguacate (Persea americana), variedad 'Hass'. Tamaño mediano.
- Pitahaya o fruta del dragón (Hylocereus polyrhizus), variedad 'Purple' con tamaño mediano.

De cada producto un sub-lote de 20 piezas se utilizó para el ensayo de agarra y otro sub-lote para la caracterización destructiva del producto.

Garra robot

La garra robot utilizada se ha desarrollado dentro del marco del proyecto de investigación "Recolección inteligente y automatizada de cultivos de alto valor en invernaderos sostenibles" (DRAGONBOT), financiado por la Agencia Valenciana de la Innovación.

El manipulador o garra robot es un modelo de herramienta final “suave” ("soft gripper") capaz de manipular productos delicados con un sistema de dedos flexibles y adaptables. Consta de cuatro dedos flexibles, que envuelven la fruta durante la operación de recolección. Los dedos están hechos de poliuretano termoplástico utilizando impresión 3D mediante tecnología de sinterización láser. Operan con una presión de hasta 0,3 MPa y tienen una longitud de 127 mm.

El rango de apertura y cierre de los cuatro dedos del manipulador permite manejar productos de forma ovalada con diámetros entre 100 mm y 60 mm, longitudes entre 60 mm y 160 mm, y pesos de hasta 500 gramos. La deformación de los dedos les permite adaptarse independientemente a la forma de los productos. El chasis del manipulador se ha fabricado mediante impresión 3D de material de ácido poliláctico. Los dedos no tienen control de fuerza, y el robot los controla a través de una salida digital. La función de los dedos es envolver el producto y ejercer suficiente fuerza para evitar que caiga después de cortar el pedúnculo.

Los dedos del manipulador tienen tres posiciones: vacío (-0,7 MPa), presión atmosférica y presión positiva (0,30 MPa). El proceso de vacío se aplica con un eyector (SMC ZH13DSA), un dispositivo que utiliza un fluido a alta presión para crear un vacío, aumentando el rango de apertura de los dedos. El control de estas tres posiciones se gestiona a través de una válvula solenoide de centro cerrado 5/3 (SMC SY5320-5LOU-01F-Q) con tres posiciones: succión, bloqueo y presión, controlada por dos señales digitales.

Caracterización de los productos

Para la caracterización del producto se midió: dimensiones, peso, firmeza destructiva, y contenido en azúcares (Excepto Aguacate). Las dimensiones (diámetro mayor y menor) fueron medidas mediante un pie de rey digital. El peso se determinó mediante una balanza digital de precisión (KERN PFB 6000-1). La firmeza se midió utilizando una máquina universal de ensayos (Ibertest, modelo IBTH 2730) en compresión con un vástago de 1 mm (champiñón) o 8 mm. El contenido de azúcares se midió mediante un refractómetro digital (Atago model PAL-3; Atago Co., Tokyo, Japan). Para los azúcares se tuvieron que triturar y extraer el líquido libre de impurezas sólidas.

Procedimiento

El procedimiento consistió en colocar cada pieza sobre un vaso de precipitados y agarrarlo cuidadosamente con la garra robótica para depositarlo en una bandeja plástica de laboratorio con suavidad. Una vez concluido el ensayo de agarre, la bandeja se trasladó a una cámara a 6 °C y 85 % de humedad relativa, donde se

mantuvo durante cuatro días para evaluar con mayor precisión los posibles daños ocasionados por la garra robótica. Las condiciones de almacenamiento fueron idénticas a las comerciales (uso de plástico protector)

Previa a la manipulación con la garra las piezas eran pesadas y medidas las dimensiones. Posteriormente a la manipulación de cada producto un sub-lote se utilizó para la caracterización destructiva del producto (midiendo firmeza y azúcares, en el caso del caqui y pitahaya).

Los daños eran observados visualmente en el momento del agarre y a las 48 horas después del almacenamiento, midiendo la superficie de daño con el pie de rey. Posterior al almacenamiento las piezas sin daño se pelaban para observar la aparición de magulladuras no visibles exteriormente.

3. Resultados

La Tabla 1 muestra los principales resultados. En el caso de los champiñones, el 100 % de las piezas resultaron dañadas. El daño era apreciable a simple vista y al cabo de 48 h de almacenamiento el deterioro se hacía más visible. Si hablamos de los aguacates, ninguna pieza sufrió daño externo ni interno al cabo de 48 horas de almacenamiento. En lo que respecta al caqui (Figura 1), el daño severo superó ligeramente el límite del 1 % por lo que no podría clasificarse como Categoría Extra. El daño muy ligero superó el 15 % por lo que, en principio, no podría clasificarse de Categoría I (con límite de daño ligero 8 %). Sin embargo, podría clasificarse como Categoría II. Por último, la pitahaya los daños ligeros superaron el 15 %. Sin embargo, no se apreciaron daños severos, pudiendo la fruta comercializarse sin limitaciones.

Tabla 1. Características de las piezas (peso, firmeza y sólidos solubles, media y desviación estándar), porcentajes de daño (ligero y severo) y nivel de aceptación.

	Champiñón	**Caqui**	**Aguacate**	**Pitahaya**
Peso (g)	44,3 (4,1)	257,2 (23,9)	269,5 (15,5)	288,4 (91,6)
Diámetro medio (cm)	6,6 (0,4)	7,6 (0,26)	9,7 (0,5)/ 6,9 (0,3)	11,1 (1,4)/ 6,3 (1,3)
Firmeza (N/mm)	0,5 (0,2)	3,0 (1,1)	3,0 (1,1)	3,3 (0,5)*
Sólidos solubles (° Brix)	7,37	14,9 (0,1)	-	13 (1,8)
Daño ligero	100 %	> 15 %**	0 %	< 15 %
Daño severo	100 %	1,4 %	0 %	0 %
Aceptable	NO	NO***	SÍ	SÍ

* Con piel

** Daño ligero muy poco visible

*** No aceptable para una categoría extra

Los buenos resultados obtenidos con pitahaya, a pesar de ser una fruta muy delicada y pesada, están condicionados porque el diseño preliminar del prototipo se ensayó con pitahaya, condicionando las modificaciones posteriores de la garra para este producto. Sería necesario modificar y adaptar el diseño para otros productos.

(**a**) (**b**)

Figura 1. Caqui variedad "Rojo Brillante" dañado por la garra 48 horas después: (**a**) Caqui con daño externo; (**b**) Caqui con daño interno.

4. Conclusiones

Los resultados mostraron la idoneidad de la garra para manipular pitahaya y aguacate, al no producirse daño severo visible en la fruta. Sin embargo, en el caso del champiñón y el caqui, el nivel de daño ligero superó el 15 %, disminuyendo el valor de las piezas. En el caso de los champiñones y los caquis los productos no podrían comercializarse en las categorías altas, haciendo la manipulación robótica, con las condiciones empleadas en el ensayo, no aceptable para productos de alto valor añadido. Sería necesario realizar modificaciones de diseño y funcionamiento para poder utilizar el prototipo con productos como champiñones o caquis. El prototipo de garra robot estudiado podría emplearse, con las condiciones de trabajo utilizadas, para la manipulación de frutas de alto valor añadido como aguacate o pitahaya.

5. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto "RECOLECCIÓN INTELIGENTE Y AUTOMATIZADA DE CULTIVOS DE ALTO VALOR EN INVERNADEROS SOSTENIBLES (INNEST/2023/106).

6. Bibliografía

1. Cuéllar, J. S. (2023). Cultivos de alto valor: aupados por la tecnología, a las órdenes de los mercados. Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera, (1071), 12-16.
2. Hussein, Z., Fawole, O. A., & Opara, U. L. (2020). Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruits. *Horticultural Plant Journal*, *6*(1), 1-13.
3. Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2024). Mechanical damage of fresh produce: An overview. *Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control*, 1-19.
4. Vrochidou, E., Tsakalidou, V. N., Kalathas, I., Gkrimpizis, T., Pachidis, T., & Kaburlasos, V. G. (2022). An overview of end effectors in agricultural robotic harvesting systems. Agriculture, 12(8), 1240.
5. Navas, E., Fernández, R., Sepúlveda, D., Armada, M., & Gonzalez-de-Santos, P. (2021). Soft grippers for automatic crop harvesting: A review. *Sensors*, *21*(8), 2689.
6. AboZaid, Y. A., Aboelrayat, M. T., Fahim, I. S., & Radwan, A. G. (2024). Soft Robotic Grippers: A Review on Technologies, Materials, and Applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 115380.

Monitorización de viñedos mediante un robot terrestre autónomo con imagen multiespectral, LiDAR y comunicación 5G para edge computing

Barrientos, A[2]; Gómez-del-Campo, M[1 3]; Ortuño, A M[a4]; Cañizares, I[4]; Montoya, V[4]; Orbea, D[2]; del Cerro, J[2]; Atencia-Payares, L. K.[1 3]; Moya, A[1]; Diezma, B[1]; Hernández, N[1]; Delgado, H[1]; Muñoz-García, M. A.[1]; Arias, M[1]; Valero, C[1] *

[1] Universidad Politécnica de Madrid, LPF_Tagralia, Av. Pta Hierro 2, 28040 Madrid, España n.hernandez@upm.es

[2] CAR (UPM - CSIC), RobCib, C. José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España antonio.barrientos@upm.es

[3] CEIGRAM UPM, P.º de la Senda del Rey 13, 28040 Madrid, España maria.gomezdelcampo@upm.es

[4] Telefónica de España SA, Ronda de la Comunicación s/n, 28050 Madrid almamaria.ortunogomez@telefonica.com

* Contacto: constantino.valero@upm.es orcidID 0000-0003-4473-3209

Abstract: Se ha diseñado un sistema robótico para la monitorización de viñedos mediante la integración de sensores de alta resolución y gran volumen de datos. El diseño se fundamenta en aprovechar las capacidades de comunicación de las tecnologías 5G para emplear edge computing en el análisis de datos. El sistema de monitorización incluye tanto el robot equipado con una cámara multiespectral y un LiDAR 3D, como una red de sensores de campo. Se llevó a cabo un experimento para probar el sistema de monitorización en un viñedo comercial de Cabernet Sauvignon en la provincia de Toledo. La monitorización se realizó sobre 50 cepas en las que se implementaron cinco métodos diferenciados de manejo de la vegetación. También se registraron parámetros fisiológicos de la vid y se adquirieron datos sobre la cantidad y calidad de la uva. Este artículo se centra en los resultados obtenidos a partir de las imágenes multiespectrales. Estos resultados junto con los preliminares del resto de las tecnologías mencionadas muestran que es posible extraer parámetros de la base de datos que permiten seguir la evolución del cultivo, obteniendo información relevante para apoyar la toma de decisiones de la bodega en cuanto al manejo del cultivo.

Keywords: sensores, robótica, cámara, redes neuronales, LiDAR, deep learning, modelado de cultivos, datos en tiempo real

1. Introducción

Desde la introducción de sensores y tecnologías de la información y telecomunicaciones en el sector agrícola, la monitorización de viñedos se ha convertido en una práctica habitual en la agricultura avanzada, principalmente debido al alto valor añadido del producto y al uso intensivo de tecnología en este

cultivo (Barriguinha et al., 2021). Las publicaciones sobre viticultura de precisión representan un 5 % del total relacionado con agricultura de precisión (Ferro & Catania, 2023). Uno de los objetivos clave del uso de estas tecnologías es obtener y suministrar datos a viticultores y bodegueros como base para mejorar la gestión del terreno y de la vid a través de un proceso de toma de decisiones más informado, recientemente con ayuda de modelos de inteligencia artificial (Tardáguila et al., 2021). Entre la variedad de tecnologías, la teledetección proximal se ha desarrollado ampliamente (Moreno & Andújar, 2023; Berry et al, 2023; Tang et al, 2022), al igual que la robótica para exploración de cultivos y adquisición de datos (Botta et al., 2022; Roure et al., 2020). La gran cantidad de datos generados por estos sensores puede beneficiarse de tecnologías de comunicación de última generación como las redes móviles 5G y la *edge computing*. Solo proyectos recientes han explorado este camino (Edemetti et al., 2022). Investigaciones previas carecen de un enfoque integrado que combine sensores intensivos en datos, monitorización inalámbrica de plantas, comunicaciones rápidas y *edge computing* para la recolección y modelado de datos en tiempo real. El objetivo de este trabajo es desarrollar un caso de estudio mediante la implementación de un prototipo robótico para fenotipado de viñedo con sensores a bordo combinados con sensores de campo, funcionando en colaboración con una red 5G desplegada específicamente para el envío de bases de datos en tiempo real. La hipótesis de trabajo es que la combinación de datos permitirá estimar y predecir la evolución del cultivo y la cosecha final.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño de los sistemas de monitorización del viñedo

Se han utilizado múltiples sistemas para monitorizar el viñedo: un sistema robótico móvil con sensores embarcados, un conjunto de sensores de campo instalados en las cepas y un sistema de comunicación de datos con un ordenador en la nube. La unidad robótica móvil está compuesta por dos subsistemas: una plataforma móvil y un manipulador robótico. La plataforma robótica seleccionada ha sido el modelo Summit XL (Robotnik, España), debido a su robustez, fiabilidad en la navegación y versatilidad para desplazarse por terrenos irregulares al aire libre, con vegetación y tierra, y una capacidad de carga útil de 50 kg. En cuanto al manipulador robótico, se optó por el modelo Unitree Z1 Pro (Unitree, Hong Kong) para las tareas de adquisición de datos en el viñedo, debido a su alcance nominal de 740 mm y una carga útil de 3 kg, adecuada para los sensores instalados en el efector final. Según las necesidades de adquisición de datos, el sistema está dimensionado para una autonomía de 2,5 horas.

Entorno de trabajo: el equipamiento fue integrado bajo el sistema operativo robótico (ROS Noetic) en el ordenador embarcado, utilizando Ubuntu 20.04.

Sensores embarcados para navegación: se incluye un LiDAR 3D modelo VLP-16 (Velodyne, EE. UU.), con un campo de visión horizontal de 360º y vertical de 40º, un alcance de 200 m, resolución de 16 canales, frecuencia de 20 Hz y una precisión de ±3 cm. Para la localización, se integró un módulo C099-F9P-1 (Ublox, Suiza) con GPS-RTK ZED F9P. La fusión de sensores se llevó a cabo mediante una unidad de

medición inercial (IMU), GPS-RTK, odometría de ruedas y estimación de odometría basada en uno de los canales del LiDAR Velodyne.

Sensores embarcados para monitorización del cultivo: se montó una cámara multiespectral Altum (MicaSense, EE. UU.), originalmente diseñada para su integración en drones y otras plataformas aéreas, en el extremo del brazo robótico para registrar imágenes de cada planta a una distancia aproximada de 0,6 m de la cepa, capturando ambos lados de la vegetación. La cámara recoge datos en cinco bandas espectrales distintas: azul (475 nm), verde (560 nm), rojo (668 nm), borde rojo (717 nm) e infrarrojo cercano (842 nm), con anchos de banda de 20 nm para los canales azul y verde, 10 nm para los canales rojo y borde rojo, y 40 nm para el canal de infrarrojo cercano. Cada uno de los sensores de la cámara ofrece una resolución de 2064 x 1544 píxeles, con un tamaño de píxel de 3,45 µm. El análisis de las imágenes multiespectrales se orientó a dos objetivos según la fase fenológica de las plantas: 1) estimación de la densidad foliar como predictor del rendimiento potencial, y 2) identificación de racimos de uva en cada cepa, permitiendo la generación de mapas de rendimiento con resolución a nivel de planta. Cabe destacar que esta resolución espacial resulta difícil de alcanzar con sistemas basados en células de carga instaladas en máquinas de recolección. En el extremo del manipulador, se instaló un sistema LiDAR 2D (URG-04LX, Hokuyo, Japón) para registrar la nube de puntos en orientación vertical y horizontal en cada cepa, con el objetivo de realizar reconstrucciones 3D.

Se instaló en el campo un sistema de *sensores inalámbricos* para la monitorización de variables meteorológicas y del suelo, compuesto por una estación meteorológica local (Plantae, España) y ocho sensores de humedad del suelo instalados a dos profundidades (10 y 20 cm), con el objetivo de monitorizar los cuatro tratamientos diferenciados establecidos en el viñedo.

Sistema de comunicación: la conexión con la red móvil de quinta generación de Telefónica se realizó mediante un router 5G con conexión terrestre, que transmite en tiempo real los datos adquiridos por el sistema robótico. Para asegurar un buen rendimiento de la red móvil, se desplegó una antena 5G en la banda de 700 MHz en una zona próxima a la finca “Bodegas y Viñedos Casa del Valle” (Yepes, Toledo). La antena de la red pública 5G que da servicio a la finca se encuentra a una distancia de aproximadamente 2 km de la bodega, con línea de visión directa. Además, se ha probado de forma puntual la conexión mediante una red satelital, basada en constelaciones en órbita terrestre baja (LEO) y órbita geoestacionaria (GEO), como sistema de respaldo.

2.2. Diseño del experimento de campo y registros de variables fisiológicas

El estudio se llevó a cabo durante la campaña 2024 en una parcela de 4 ha de un viñedo comercial de *Vitis vinifera L.* cv. Cabernet, injertado sobre el portainjerto Selection Oppenheim 4 (SO4), ubicado en “Bodegas y Viñedos Casa del Valle”, en el término municipal de Yepes, España (39°56'26.2" N, 3°42'49.7" W), a 699 m s.n.m. El viñedo fue plantado en 2002 con un marco de plantación de 2,6 x 1,1 m. Las plantas están conducidas en cordón doble y dispuestas sobre espaldera.

Los tratamientos se diseñaron con el objetivo de generar variabilidad en la estructura de la vegetación. Para ello, se realizaron prácticas de aclareo selectivo de brotes y hojas (deshojado), aplicadas en diferentes porcentajes según los objetivos específicos de cada tratamiento. Adicionalmente, se efectuó un recorte de la parte inferior del follaje para evitar que los brotes invadieran el espacio entre líneas. Esta estrategia permitió una modulación controlada de la arquitectura de la vegetación, buscando diferencias en la exposición lumínica, la ventilación y las condiciones microclimáticas del dosel. Mediante la implementación de estas prácticas, el estudio pretendía evaluar su influencia en las respuestas fisiológicas, la calidad del fruto y el rendimiento general de las plantas.

Para la adquisición de datos, se delimitaron cinco tratamientos consecutivos en hilera, con 10 cepas contiguas por tratamiento (50 cepas en total), etiquetadas como:

- Tratamiento 1 (T1): 50% de hojas eliminadas
- Tratamiento 2 (T2): 25% de hojas eliminadas
- Tratamiento 3 (T3, tratamiento de referencia): despunte ligero de brotes
- Tratamiento 4 (T4): 50% de brotes eliminados
- Tratamiento 5 (T5): 25% de brotes eliminados

El potencial hídrico del tallo (SWP) se midió (MPa) en nueve fechas: 29 de mayo, 5 y 19 de junio, 3, 17 y 31 de julio, 14 y 28 de agosto, y 2 de septiembre, utilizando una cámara de presión tipo Scholander (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, CA, EE. UU.). La conductancia estomática se evaluó con un porómetro de hoja de estado estacionario (SC-1, Decagon Devices, WA, EE. UU.), y el contenido de clorofila en hojas (µmol de clorofila/m² de área foliar) se midió con un sensor MC-100 (Apogee Instruments Inc., Logan, UT, EE. UU.). Las tres mediciones se realizaron inmediatamente después del escaneo efectuado por el robot en cada una de las fechas de ensayo.

Las características del dosel vegetal se estimaron mediante análisis de punto cuadrante (PQA, por sus siglas en inglés) como mediciones de referencia, realizadas los días 28/05/2024, 05/06/2024, 19/06/2024 y 03/07/2024. También se registraron la altura y el ancho del dosel, a partir de los cuales se calculó el volumen del mismo. En cada intervalo horizontal, el ancho del dosel se midió a tres alturas desde el suelo: 90, 120 y 150 cm.

Las cepas experimentales se cosecharon manualmente el 02/09/2024. Se contabilizaron y pesaron los racimos por cepa. Posteriormente, se seleccionaron entre 150 y 200 bayas para su análisis, determinando los sólidos solubles totales (°Brix) y el pH.

3. Resultados y discusión

La interfaz del sistema robótico incluye dos ventanas, correspondientes a la navegación del robot (planificación de trayectorias y evasión de obstáculos estáticos y dinámicos) y a la adquisición de datos. La etapa de adquisición de datos comprende la reconstrucción 3D de la cepa y la captura de imágenes

multiespectrales. Este artículo se centra en los resultados obtenidos del análisis de las imágenes multiespectrales, presentando, por un lado, los avances alcanzados en la estimación de la densidad foliar, y por otro los relativos a la estimación de la cosecha por cepa.

Para la estimación de la densidad foliar, se encontró que el canal de borde rojo proporciona un mayor contraste en los píxeles del follaje, probablemente debido a su capacidad para penetrar los tejidos vegetales y revelar hojas subyacentes. Los valores de escala de grises más altos corresponden a áreas con menos capas sucesivas de hojas, lo que conduce a diferencias en los histogramas en función de la densidad foliar.

Para cuantificar estas diferencias en los histogramas, se calculó un índice definido como el inverso de los valores de intensidad, denominado DGI. La suma de los valores de DGI proporciona una indicación de la cantidad de follaje en la imagen. Esta suma tiene en cuenta tanto el número de píxeles como un valor ponderado que otorga mayor importancia a los píxeles más sombreados, los cuales probablemente correspondan a zonas con mayor solapamiento de hojas (mayor densidad foliar). La Figura 1 muestra ejemplos de imágenes del canal de borde rojo y sus correspondientes imágenes virtuales de DGI, junto con los histogramas de dos cepas con diferentes densidades foliares. Los análisis en curso buscan determinar si la suma total del DGI permite diferenciar entre cepas con distinta densidad de follaje y si esta se correlaciona con el rendimiento posterior.

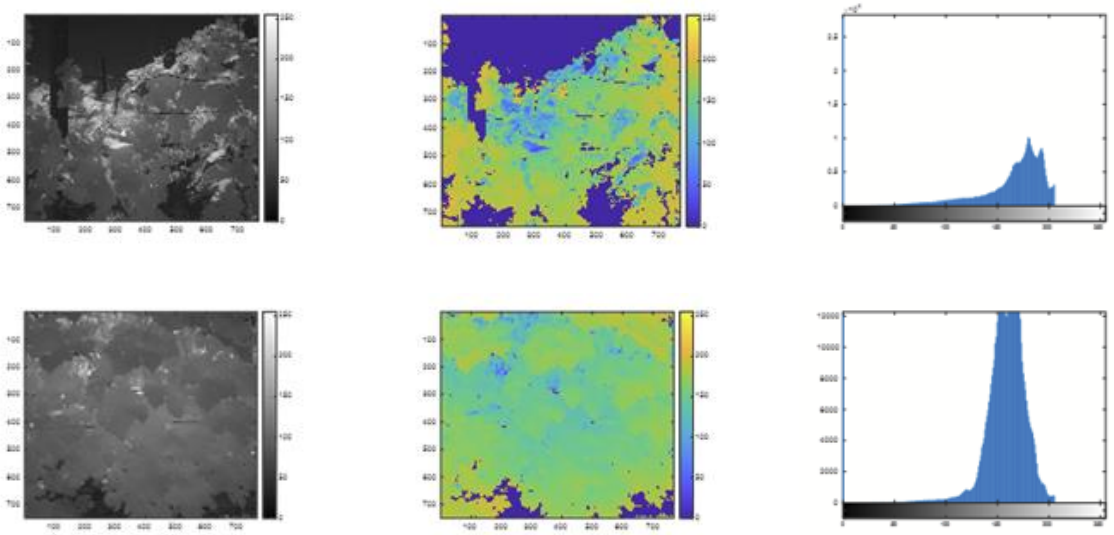


Figura 1. Imágenes del canal de borde rojo de cepas con bajo(arriba) y alta (abajo) densidad foliar y sus correspondientes imágenes virtuales e histogramas del índice DGI.

Para la segmentación de los racimos de uvas se implementó una red neuronal convolucional, donde se utilizaron 53 imágenes y sus respectivas máscaras segmentadas, todas con la misma escala y resolución. El preprocesamiento incluyó redimensionamiento a 512x512 píxeles, verificación de alineación entre imágenes y máscaras, y normalización de máscaras, convirtiendo las máscaras binarias (blanco/negro) en categóricas con etiquetas “uvas” y “*background*”, lo que permite a la red identificar los racimos y diferenciar del fondo. Se utilizó la red DeepLab v3+

con ResNet-18, como extractor de características. Este diseño es adecuado para tareas de segmentación semántica, y fue adaptado en MATLAB mediante la función deeplabv3plusLayers para trabajar con las clases definidas. Cada píxel fue clasificado como "uva" o "backgroup", y se aplicó un cálculo automático de pesos por clase para evitar sesgo hacia el fondo, algo común cuando este predomina en las imágenes. Esto permitió equilibrar el aprendizaje y mejorar la detección de los racimos. Para el entrenamiento, se dividió el conjunto de datos en 80% para entrenamiento y 20% para evaluación. Se entrenó durante 50 épocas, con mini-lotes de 4 imágenes, utilizando el optimizador Adam. Se monitoreó el desempeño en tiempo real para asegurar una buena generalización y prevenir el sobreentrenamiento.

Una vez que se obtuvo la red de entrenamiento, se usó para segmentar todas las imágenes, un total de 700 imágenes correspondientes a las 50 cepas, capturadas en siete fechas de adquisición de datos durante la campaña 2024: 19 de junio, 3 de julio, 17 de julio, 14 de agosto, 28 de agosto y 2 de septiembre. Además, se aplicaron operaciones morfológicas para la eliminación de ruido y cerrar huecos. Se muestra en las Figuras 2 y 3 los resultados obtenidos de la segmentación de los racimos de uvas.

La identificación de racimos de uva requirió el registro de las imágenes de los canales R, G y B para generar una imagen en color, lo que hizo necesario adaptar rutinas para identificar píxeles homólogos en las imágenes de los tres canales. La corta distancia entre el vehículo y la vegetación hace que el área capturada en la imagen de cada canal difiera significativamente, complicando el proceso de registro y concatenación.

Figura 2. Imagen a color; máscara binaria e imagen segmentada 5_back_31_07

Figura 3. Imagen a color; máscara binaria e imagen segmentada 2_front_02_09

Para el registro de imágenes capturadas en los canales R, G y B se empleó la función imreg del paquete de Python especializado en registro de imágenes y utilizando transformaciones de tipo "similarity". Este enfoque aseguró la correcta alineación de los canales rojo (R), verde (G) y azul (B), los cuales fueron generados a partir de

secuencias capturadas desde las dos caras de la vegetación (back y front). Como resultado final del proceso de registro se obtiene una imagen en color, por cepa y por lado (Figura 4)

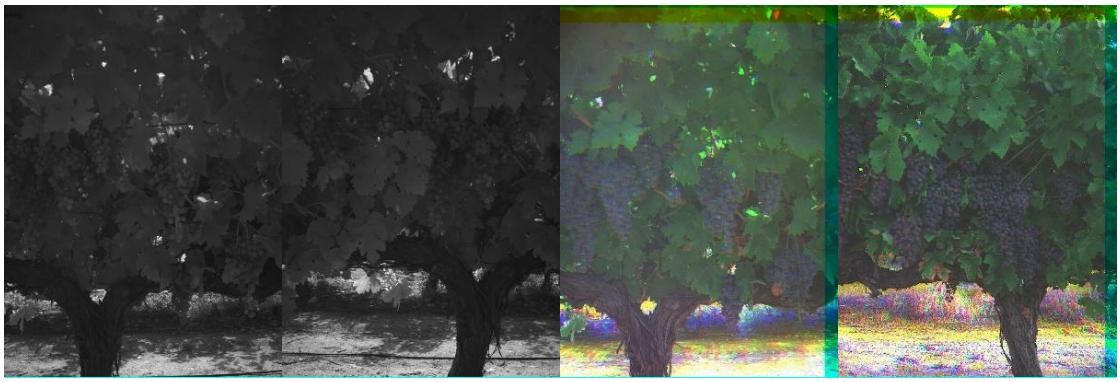


Figura 4. Imágenes en escala a gris de los canales RGB vs imágenes de color 10_back y 10_front

La cuantificación de los píxeles correspondientes a los racimos de uva se realizó a partir de las máscaras segmentadas, donde los píxeles de interés estaban representados por valores binarios de 1. La suma de estos valores permitió estimar el área relativa ocupada por los racimos en cada imagen.

Para la estimación de la producción por cepa, se emplearon solo los datos de la cosecha y se implementó un modelo de regresión basado en máquina vectores de soporte (SVM) en Matlab. El modelo utilizó como variables predictoras el porcentaje de área ocupada por racimos, obtenido a partir de la segmentación de las imágenes RGB, y el volumen foliar por planta estimado mediante análisis de punto cuadrante. Este enfoque permite complementar la información de las imágenes que estiman píxeles de uva con los parámetros estructurales de la planta. El modelo SVM alcanzó una precisión de precisión del 70 % (R^2 = 0,70) (Figura 5), y un RMSE de 1,08 lo que indica que logra capturar una parte significativa de la variabilidad en la producción. Sin embargo, es necesario seguir optimizando el enfoque para mejorar su capacidad predictiva.

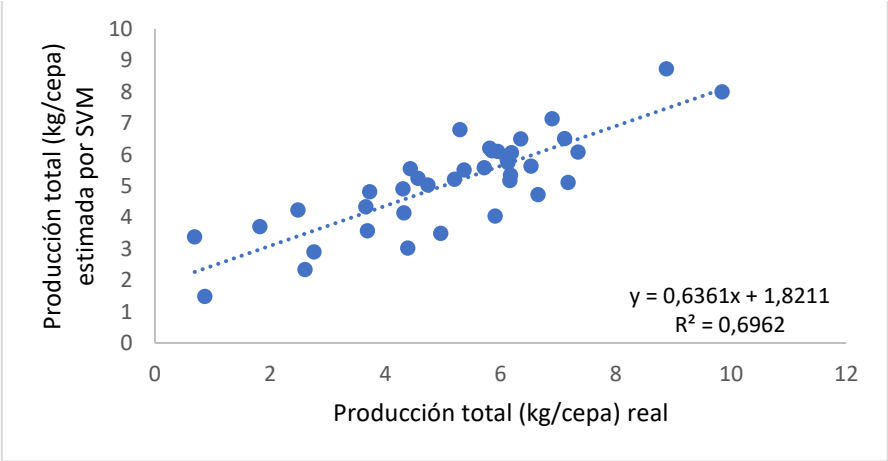


Figura 5. Estimación de la cosecha de uva

4. Conclusiones

Se ha diseñado e implementado un sistema automático de adquisición de datos para el registro de imágenes y nubes de puntos, junto con sensores de campo. El análisis de datos realizado hasta el momento muestra resultados prometedores tanto para la reconstrucción del volumen del follaje como para la estimación del rendimiento.

La segmentación semántica mediante redes neuronales permitió identificar de forma precisa los racimos de uva en imágenes RGB, aportando información clave para estimar la producción por cepa. Al combinar estos datos con características estructurales de la planta, se entrenó un modelo SVM que alcanzó una precisión aceptable (R^2 = 0,70; RMSE de 1,08). Para mejorar su desempeño, se recomienda ampliar el conjunto de datos incorporando registros de cosechas de años anteriores, lo que fortalecería la capacidad predictiva del modelo y su aplicabilidad en escenarios reales.

Proveer una infraestructura de comunicaciones y computación en la nube (en este caso, computación en el borde) es esencial para asegurar la captura, el envío y el procesamiento de datos que permitan el desarrollo de nuevos casos de uso para la agricultura inteligente. Uno de los puntos fuertes de este proyecto es el uso de la red 5G desplegada en zonas rurales en la frecuencia de 700 MHz. La red fue capaz de transmitir datos en tiempo real a velocidades mucho más altas que generaciones anteriores de telefonía móvil, dado que los archivos enviados por el robot tienen tamaños del orden de varios GB. Los usuarios finales pueden disponer de datos en tiempo real, históricos y modelos predictivos que les ayuden a tomar decisiones basadas en datos y a aplicar viticultura de precisión.

Financiación: La financiación para este estudio ha sido provista por Telefónica de España S.A. y por fondos propios de los grupos de investigación de la UPM que han participado en el trabajo: RobCib, LPF_Tagralia y Ceigram.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer al viñedo “Casa del Valle” (Grupo Bodegas Olarra) por las facilidades y medios proporcionados para llevar a cabo este trabajo. El equipo de investigación agradece especialmente a Telefónica de España S.A. la financiación y colaboración continua del Departamento de Innovación, cuyo apoyo ha sido clave para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

1. Barriguinha, A., de Castro Neto, M., & Gil, A. Vineyard Yield Estimation, Prediction, and Forecasting: A Systematic Literature Review. Agronomy, 2021; 11(9), 1789. doi.org/10.3390/agronomy11091789
2. Ferro, M. V., & Catania, P. Technologies and Innovative Methods for Precision Viticulture: A Comprehensive Review. Horticulturae, 2023; 9(3), 399. doi.org/10.3390/horticulturae9030399
3. Tardaguila, J., Stoll, M., Gutiérrez, S., Proffitt, T., & Diago, M. P. Smart applications and digital technologies in viticulture: A review. Smart Agricultural Technology, 2021; 1, 100005. doi:10.1016/j.atech.2021.100005
4. Moreno, H., & Andújar, D. Proximal sensing for geometric characterization of vines: A review of the latest advances. Computers and Electronics in Agriculture, 2023; 210, 107901. doi:10.1016/j.compag.2023.107901

5. Berry, A, Vivier M. A, Poblete-Echeverría C. Evaluation of canopy fraction-based vegetation indices, derived from multispectral UAV imagery, to map water status variability in a commercial vineyard. Irrigation Science, 2023; doi.org/10.1007/s00271-023-00907-1
6. Tang, Z., Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., & de Castro, A. I. (). Vine water status mapping with multispectral UAV imagery and machine learning. Irrigation Science, 2022; doi.org/10.1007/s00271-022-00788-w
7. Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., Colucci, G., Tagliavini, L., & Quaglia, G. (). A Review of Robots, Perception, and Tasks in Precision Agriculture. Applied Mechanics, 2022; 3(3), 830-854. doi.org/10.3390/applmech3030049
8. Roure, F., Bascetta, L., Soler, M., Matteucci, M., Faconti, D., et al. Lessons Learned in Vineyard Monitoring and Protection from a Ground Autonomous Vehicle. In: Grau, A., et. al (eds) Advances in Robotics Research: From Lab to Market. Springer Tracts in Adv Robotics, 2020, vol 132. Springer, doi.org/10.1007/978-3-030-22327-4_5
9. Edemetti F. , Maiale A. , Carlini C. , D'Auria O. , Llorca J. , & Maria Tulino A. Vineyard digital twin: Construction and characterization via UAV images – DIWINE proof of concept. 2022 IEEE 23rd Int Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2022; pp. 601–606. doi: 10.1109/WoWMoM54355.2022.0009

Use of autonomous vehicles to control agricultural losses caused by predatory foraging birds

David Mostaza-Colado[1,*]; Lorena Parra[2], José Marín[3], Alejandro Alonso[1] and Pedro V. Mauri Ablanque[1]

[1] Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario. Autovía A-2, km. 38,200. 28805, Alcalá de Henares, Madrid, Spain.

[2] Departamento de Producción Agrícola, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain; lorena.parra@upm.es

[3] Áreaverde – MG Projects S.L., Calle Oña 43, 28050, Madrid, Spain; jmarin@areaverde.es

* Correspondence: david.mostaza@madrid.org; Tel.: +34 918 77 94 09

Abstract: Crop productivity faces challenges from environmental conditions, pests, and animal foraging, causing major economic losses. Bird-related pre-harvest losses can reach 85%, especially in crops like sorghum, chickpeas, and pigeon peas. Traditional deterrent methods, such as visual, auditory, and tactile techniques, often become ineffective over time or are costly and environmentally harmful. Recent innovations in sensor-based and IoT-driven solutions offer more sustainable alternatives. Wireless sensor networks (WSN) using passive infrared (PIR) and laser perimeter (LPS) sensors along with actuators like lights and sounds show promise but lose efficiency as crops grow. Drones with deterrents like reflective tapes, predator sounds, and ultrasonic emitters have had mixed success due to battery life and operational challenges. IMIDRA introduces an advanced system combining automatic detection with drones to prevent bird-related crop losses, particularly in chickpeas. The system uses PIR and LPS sensors to detect birds and deploys drones equipped with deterrent elements. Additionally, it incorporates energy-harvesting mechanisms for greater autonomy and a meteorological station for predictive bird presence analysis. This innovative approach aims to provide a cost-effective, efficient, and eco-friendly solution that disperses birds in over 90% of test cases, preventing or mitigating crop damage in crops.

Keywords: bird deterrence; sensor-based technology; crop protection,

1. Introduction

Crop losses due to bird foraging pose a significant challenge for global agriculture, especially in leguminous and grain crops such as chickpeas, sorghum, and pigeon peas. Studies indicate that bird-related pre-harvest losses can exceed 85% in some cases [1, 2]. This issue not only impacts food production but also threatens farmers' economic stability [3]. Traditional bird deterrence methods include visual, auditory, and tactile techniques, such as scarecrows, predator sounds, reflective tapes, and ultrasonic emitters [4-9]. However, these methods tend to lose effectiveness over time as birds adapt to them [9]. Moreover, many deterrence strategies require frequent human intervention, increasing operational costs and reducing efficiency.

In recent years, technological advancements in precision agriculture have facilitated the development of automated bird deterrent systems based on the Internet of Things (IoT). IoT-driven solutions integrate sensor networks, real-time data analysis, and autonomous drones to enhance deterrence strategies [10]. These systems offer a cost-effective, scalable, and environmentally friendly alternative to traditional methods.

This paper presents a novel IoT-based drone system designed to detect and deter birds in crop fields. The system integrates a network of sensors with a drone equipped with deterrent elements, such as ultrasonic emitters, predator sounds, and flashing lights. By automating bird deterrence, this approach aims to minimize crop losses while reducing human intervention.

2. Materials and Methods

The proposed system operates within an IoT framework that includes multiple sensor nodes deployed strategically across the crop field. These nodes comprise two main types of sensors: 1) laser perimeter sensors (LPS) to create an invisible grid that detects bird entry when interrupted that serve as the primary detection mechanism, reducing false alarms caused by environmental factors like wind movement in the vegetation; and 2) passive infrared (PIR) sensors, in where once the laser perimeter sensors detect bird presence, PIR sensors confirm the location of the birds, ensuring accurate tracking (Figure 1).

The LPS used are the ABE-150. The distance between the transmitter and receiver can be up to 150 m. In addition to these sensors, PIR sensors are used to confirm the exact location of the birds. These PIR sensors are different depending on the location of the sensor node. While the nodes at the extremities of the grid have only a single PIR sensor, the nodes in the middle of the grid have multiple sensors that monitor different angles and therefore different areas. Regardless of the number of sensors, all sensors are located in the horizontal plane and none of them measure the presence of birds in the vertical plane.

Figure 1. Schematic diagram of the proposed system: PIR and LPS sensors, meteorological station, and integrated solar-powered battery units. Installed in Finca El Encín – IMIDRA (Alcalá de Henares, Madrid).

LPS and PIR sensor nodes are connected via LoRa (Long Range) communication technology, which allows low-power, long-range wireless data transmission. All nodes relay data to a central base station, which processes the information using cloud computing. When bird presence is confirmed, the base station activates the drone and calculates an optimal flight path based on the sensors information to target affected areas, disperse the birds, and transmits real-time flight and deterrence data back to the base station. In order to be effective, the drone can be equipped with multiple deterrent mechanisms, such as: 1) ultrasonic emitters that produce high-frequency sounds irritating to birds but inaudible to humans; 2) predator sounds as recorded calls of natural bird predators to increase the effectiveness of the deterrence system; and 3) flashing lights and reflective tapes that work as visual deterrents disrupting bird activity and making them feel unsafe in the field.

To ensure continuous operation, the system integrates solar-powered battery units, reducing dependency on external power sources. Additionally, a meteorological station collects weather data, including temperature, wind speed, and humidity, which are used to predict bird activity patterns along with fly/no-fly conditions through the processing node. The entire system is controlled via a user-friendly mobile application, allowing farmers to monitor deterrence events, access real-time sensor data, and receive automated reports on bird activity and weather conditions.

3. Results

Field trials demonstrated the effectiveness of combining LPS and PIR sensors, significantly reducing false alarms compared to previous bird detection methods that relied solely on PIR sensor. The system accurately detected bird entry and location, ensuring efficient activation of deterrent mechanisms. The autonomous drone successfully dispersed birds in over 90% of test cases, preventing crop damage. The combination of ultrasonic emitters, predator sounds, and flashing lights proved highly effective in scaring birds away, with a longer-lasting deterrence effect compared to static deterrents. Furthermore, real-time data processing allowed the system to optimize drone flight patterns, improving response times and minimizing unnecessary battery consumption. The integration of cloud computing and machine learning algorithms enhanced decision-making by predicting bird activity based on environmental conditions.

4. Discussion

Despite its success, the system faced several challenges, such as: 1) battery limitations as the drone's flight time was constrained by battery life, requiring optimization of flight paths to maximize deterrence coverage. Algorithm-based models have been proposed to optimize battery usage; however, current implementations have only achieved a 3% reduction in consumption [11]; 2) environmental interference as dense vegetation occasionally obstructed sensor performance, leading to minor detection delays; and 3) the need for human intervention as, although largely autonomous, occasional manual supervision was necessary for system calibration and maintenance as well as a legal requirement to monitor the drone throughout the flight time.

5. Conclusions

The proposed IoT-driven drone system offers an effective, automated solution for mitigating bird-related crop losses. By integrating sensor networks, real-time data processing, and autonomous drones, this approach provides a cost-efficient, scalable, and environmentally friendly alternative to traditional deterrent methods. The combination of laser perimeter sensors and PIR sensors significantly improves bird detection accuracy, while the multi-element drone deterrence system ensures efficient and long-lasting bird dispersal. The use of solar-powered energy sources and cloud-based analytics further enhances system sustainability and autonomy.

By leveraging advanced IoT and drone technologies, this system represents a significant step forward in sustainable precision agriculture, helping farmers protect their crops efficiently while minimizing environmental impact.

Future Work

To further improve system efficiency, future research will focus on: 1) enhancing battery performance: Exploring alternative energy sources, such as wireless charging stations for drones, to extend operational time; 2) refining detection algorithms to implement machine learning techniques to further reduce false alarms and improve bird activity predictions; and 3) expanding system applications adapting the system for use in different agricultural environments and integrating additional sensors for broader coverage.

6. Patents

This device is protected by a utility model registered in the name of IMIDRA and Áreaverde - MG Projects, S.L.

Author Contributions: Conceptualization, J.M, P.M and D.M.C.; methodology, D.M.C, and L.P; investigation, D.M.C., L.P., A.A., J.M. and P.M.; resources, J.M. and P.M.; writing original draft preparation, D.M.C.; writing, review and editing, D.M.C., A.A., L.P.; supervision, J.M and P.M.; project administration, J.M.; funding acquisition, J.M, P.M. and D.M.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been funded by the Community of Madrid, within the FP24-AGROCONTROL project through IMIDRA.

Acknowledgments: To the collaborating entities that have supported and provided assistance to IMIDRA in the development of the FP24-AGROCONTROL project in, trials and tests carried out is acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Kale, M. A., Dudhe, N., Kasambe, R., & Bhattacharya, P. (2014). Crop depredation by birds in Deccan Plateau, India. International Journal of Biodiversity, 2014(1), 947683.
2. Roy, S., Mazumdar, N., Pamula, R., & Tarkas, D. (2021). Efficient pest bird-controlling algorithm in unmanned agriculture system. In Evolving Technologies for Computing,

Communication and Smart World: Proceedings of ETCCS 2020 (pp. 489-502). Springer Singapore.
3. Dwivedi, S. A., & Sonawane, V. K. (2024). Sustainable Management Practices in Contrast to Pod Borer, Helicoverpa armigera (Hubner), in Chickpea. Antimicrobial Resistance in Agriculture and its Consequences, 111-130.
4. Rivadeneira, P., Kross, S., Navarro-González, N., & Jay-Russell, M. (2018). A review of bird deterrents used in agriculture. In Proceedings of the Vertebrate Pest Conference (Vol. 28, No. 28).
5. Franklin, A. B., & VerCauteren, K. C. (2016). Keeping wildlife out of your food: mitigation and control strategies to reduce the transmission risk of food-borne pathogens. Food safety risks from wildlife: challenges in agriculture, conservation, and public health, 183-199.
6. Ainsley, M., & Kosoy, N. (2015). The tragedy of bird scaring. Ecological Economics, 116, 122-131.
7. Navarro-González, N., & Jay-Russell, M. T. (2016). Use of falconry to deter nuisance birds in leafy greens fields in Northern California. In Proceedings of the Vertebrate Pest Conference (Vol. 27, No. 27).
8. Aboltins, A., Pikulins, D., Grizans, J., & Tjukovs, S. (2021). Piscivorous bird deterrent device based on a direct digital synthesis of acoustic signals. Elektronika ir Elektrotechnika, 27(6), 42-48.
9. Pruteanu, A., Vanghele, N., Voicea, I., Găgeanu, I., Nițu, M., & Cristea, M. (2023). A review on visual and auditory devices used in repelling birds from agricultural crops.
10. Sanislav, T., Mois, G. D., Zeadally, S., & Folea, S. C. (2021). Energy harvesting techniques for internet of things (IoT). IEEE access, 9, 39530-39549.
11. Datsko, D., Nekovar, F., Penicka, R., & Saska, M. (2024). Energy-Aware Multi-UAV Coverage Mission Planning With Optimal Speed of Flight. IEEE Robotics And Automation Letters, 9(3), 2893-2900.

Aplicación de algoritmos ISAR para la detección de yesca en vid

Carmen Jarén[1,2*], Silvia Arazuri[1,2], Ainara López-Maestresalas[1,2], Edison Javier Mejia[3], Iñigo Ederra[3,4] and Juan Carlos Iriarte[3,4]

[1] Departamento de Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad Pública de Navarra, España;

[2] Instituto de Innovación y Sostenibilidad en la Cadena Agroalimentaria (ISFOOD), Universidad Pública de Navarra, España;

[3] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación, Universidad Pública de Navarra, España;

[4] Instituto de Smart Cities (ISC), Universidad Pública de Navarra, España;

* cjaren@unavarra.es

Abstract: La aplicación de la tecnología ISAR a frecuencias de THz permite la obtención de imágenes de objetos en los que se pueden diferenciar materiales con distintas propiedades de forma no destructiva. Además, la sensibilidad de este rango de frecuencia a la presencia de agua facilita la detección de zonas secas, como pueden ser los sectores enfermos de troncos de vid debidos a la presencia de yesca. En el presente trabajo se han aplicado algoritmos ISAR para la toma de imágenes de troncos de madera con defectos previamente introducidos que simulen los efectos de la yesca, como sectores vacíos o agujeros en su parte central. Los resultados obtenidos muestran los defectos en las imágenes procesadas. Este estudio sirve de punto de partida para aplicación de los algoritmos ISAR a troncos de vides enfermas.

Abstract: The use of ISAR technology at THz frequencies allows the acquisition of objects images in which materials with different properties can be distinguished using a non-destructive method. Moreover, the sensitivity of this frequency range to the presence of water allows the detection of dry areas, such as diseased areas of vine trunks due to the presence of yesca. In this work, ISAR algorithms have been applied to obtain images of wood trunks with defects previously introduced to simulate the effects of yesca, such as empty sectors or holes in their central part. The results obtained show the defects in the processed images. This study provides a starting point for the application of ISAR algorithms to diseased grapevine trunks.

Keywords: Inverse Synthetic Aperture Radar; Enfermedades fúngicas; Viña; Terahercios; THz.

1. Introducción

Las enfermedades del tronco de la vid son una de las principales preocupaciones del sector vitivinícola en la actualidad [1], y entre ellas, la yesca es la que mayor incidencia e impacto económico tiene en los viñedos ya que carece de tratamientos eficaces y para su detección es necesario emplear técnicas destructivas.

La banda de frecuencias de terahercios (THz) ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años. Los THz permiten penetrar en una gran variedad de objetos, sustancias y materiales permitiendo ver lo que hay en su interior, siendo a la vez muy sensibles a la presencia de agua. Gracias a estas propiedades se pueden desarrollar sistemas no invasivos para controlar el contenido de agua de las plantas colocando el sensor en el tronco. Se han aplicado exitosamente para monitorizar el contenido en agua en vides utilizando tanto equipos de uso general [2,3] como equipos de bajo coste basados en tecnología radar [4]. El hecho de que la yesca se manifieste secando sectores de los brazos o tronco de las cepas facilita la detección en estos rangos de frecuencia, ya que permite diferenciar entre madera viva (húmeda por tener vasos activos) y madera muerta (afectada por yesca).

Para la caracterización de las vides en THz se pueden utilizar distintas técnicas, como la tomografía [5] o las técnicas MIMO [6] o ISAR (Inverse. Synthetic Aperture Radar) [7,8].

En este trabajo se han desarrollado algoritmos ISAR para inspeccionar troncos de vid y evaluar la presencia de sectores de madera muerta debidos a yesca.

2. Materiales y métodos

2.1. Desarrollo de algoritmos ISAR

Las técnicas ISAR permiten la obtención de imágenes de objetos que o bien rotan sobre su propio eje y son observados desde un punto fijo, o bien el punto de observación rota alrededor del objeto tal y como se muestra en la Figura 1. Esta configuración permite medir el campo reflejado en todo el contorno del objeto, para posteriormente procesar los datos y poder representar las imágenes. Esta técnica es aplicable a cualquier rango de frecuencia. En el caso del presente trabajo, se ha elegido el rango de las frecuencias de THz debido a su sensibilidad a la presencia de agua. El agua en estas frecuencias atenúa considerablemente la señal con lo que permite discernir zonas secas de zonas húmedas, pudiendo detectar la presencia de sectores del tronco secos frente a los húmedos, que es precisamente como se manifiesta la yesca en troncos de vides. Por lo tanto, el primer paso ha sido el desarrollo y adecuación de algoritmos ISAR a las frecuencias de THz.

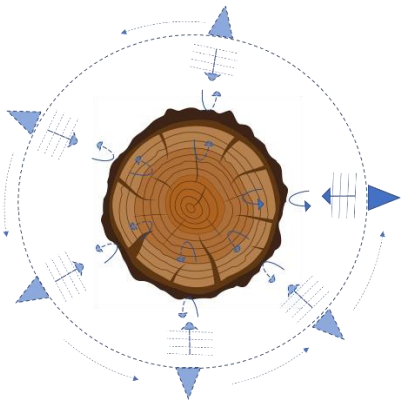
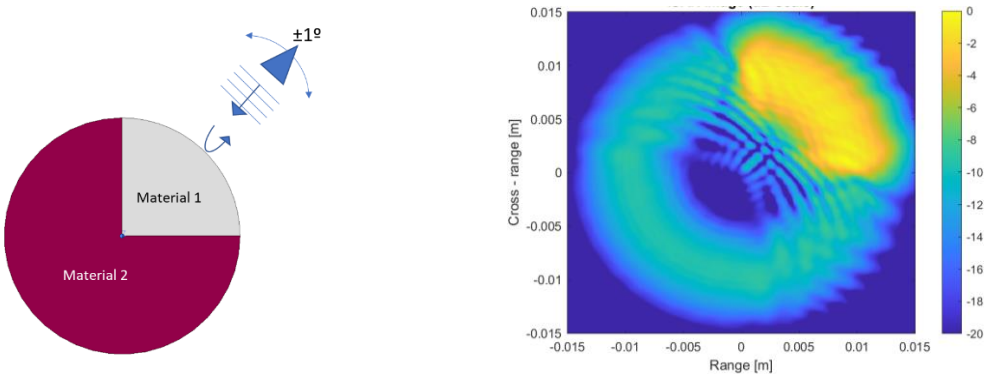


Figure 1. Configuración ISAR de medida en la que la antena rota alrededor del tronco a caracterizar.

Inicialmente se ha comprobado el correcto funcionamiento de los algoritmos utilizando datos obtenidos en simulación. Para ello se ha diseñado en Ansys HFSS un tronco cilíndrico formado por dos materiales distintos, con permitividades dieléctricas diferentes, representando el efecto de la yesca (Figura 2.a). A este cilindro se le incide con una onda plana en el rango de 77 GHz a 110 GHz y se obtiene la reflexión del campo incidente girando el tronco cada grado, cubriendo 360º. Tras aplicar el algoritmo a los datos simulados, se comprueba la diferencia obtenida entre el sector "sano" (zona roja) y el "enfermo" (zona gris) del cilindro (Figura 2.a), quedando claramente diferenciados en la imagen de THz obtenida en verde y amarillo respectivamente (Figura 2.b). Se muestra, por lo tanto, el correcto funcionamiento del algoritmo de procesado en condiciones ideales en el que el tronco es un cilindro perfecto formado por dos materiales uniformes diferenciables entre si.

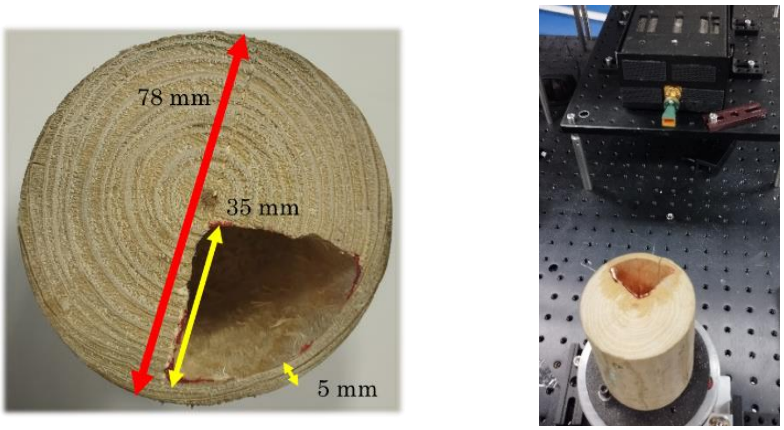


(**a**) (**b**)

Figure 2. (**a**) Tronco simulado en Ansys HFSS con dos materiales con distintas permitividades dieléctricas; (**b**) Imagen obtenida al aplicar el algoritmo ISAR a los datos simulados.

2.2. Aplicación de algoritmo ISAR

Una vez validado el algoritmo para el caso de un cilindro ideal en simulación, se han realizado medidas de laboratorio utilizando un cilindro de madera al que se le ha vaciado un sector, buscando contraste entre dos materiales distintos, madera y aire (Figura 3.a), que presentan distintas constantes dieléctricas. El cilindro se coloca sobre un motor rotatorio y se mide la reflexión de la muestra utilizando un Analizador Vectorial de Redes con cabezales externos en el rango de 77 GHz a 110 GHz. Para ello, se gira la muestra 360º con pasos de 1º (Figura 3.b) y se procesan los resultados. En concreto, se procesa la reflexión de la onda incidente al cilindro en cada una de las medidas. La reflexión presenta información de la distancia a la que se encuentra el cilindro con respecto a la antena bocina utiliza para iluminar la muestra, que viene dada por la posición de las reflexiones en el dominio del tiempo, así como de la posición de los cambios de materiales. Además, la amplitud de cada una de las reflexiones que aparecen al encontrar la onda un cambio del medio depende del contraste entre los materiales. El contraste entre la constante dieléctrica de los mismos, que en el caso del aire toma un valor de 1 y para la madera seca toma un valor de entre 2 y 3. Con todas las medidas se compone la imagen.



(**a**) (**b**)

Figure 3. (**a**) Cilindro de madera con un sector de aire; (**b**) Sistema de medida en THz en laboratorio.

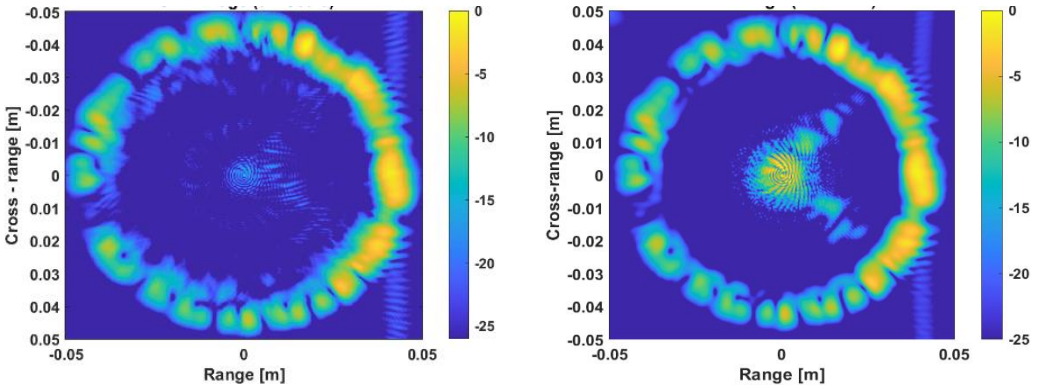
3. Resultados

La imagen obtenida se muestra en la Figura 4.a, donde se observa claramente el contorno del cilindro, debido a la reflexión del campo incidente en la primera superficie que se encuentra la onda radiada por la antena al propagarse por el aire. El cambio de permitividad dieléctrica entre el aire y la madera genera la reflexión parcial del campo incidente. Cuanto mayor es la diferencia de constante dieléctrica entre el aire y el objeto, mayor es la magnitud de la reflexión. Esto queda reflejado en la imagen con un amarillo más intenso que coincide con el sector de aire generado en el cilindro. En la Figura 4.a se intuye la transición de aire a madera del interior del tronco, pero debido a que el campo se va atenuando al propagarse dentro de la muestra el nivel de la reflexión es inferior al del borde exterior.

Para poder mejorar la resolución interior de la medida se optimiza el algoritmo de procesado de forma que se tenga en cuenta la atenuación al propagarse por el interior de la muestra dando lugar a imágenes más definidas, como la que se muestra en la Figura 5.

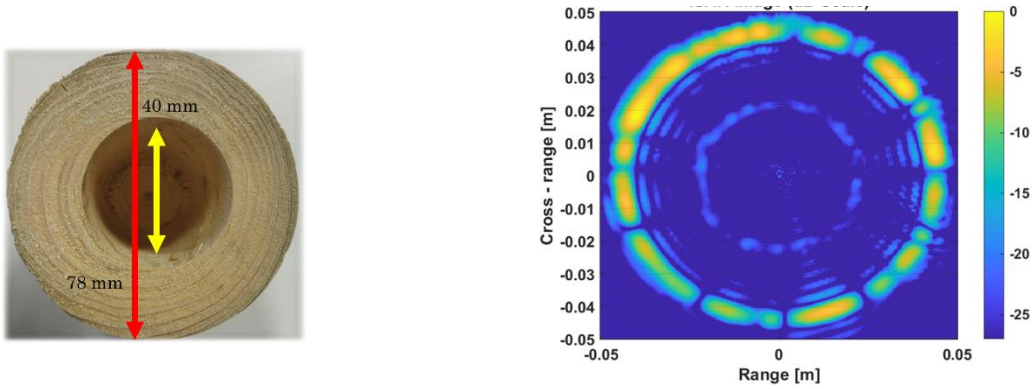
Para confirmar el correcto funcionamiento del algoritmo con diferentes configuraciones se ha medido un tronco con un agujero cilíndrico en su interior tal y como se muestra en la Figura 5.a. Al igual que en el caso anterior, al aplicar el algoritmo optimizado se aprecia tanto el contorno del tronco como en contorno del agujero dentro del mismo (Figura 5.b).

Por lo tanto, se ha comprobado la viabilidad de aplicar algoritmos ISAR para la detección de sectores o defectos en troncos. Actualmente se están realizando medidas en vides con presencia de yesca.



(**a**) (**b**)

Figure 4. (**a**) Imagen obtenida al aplicar el algoritmo ISAR al cilindro de madera con sector de aire en laboratorio; (**b**) Imagen obtenida al aplicar el algoritmo ISAR optimizado al cilindro de madera con sector de aire en laboratorio.



(**a**) (**b**)

Figure 5. (**a**) Cilindro de madera con un sector de aire; (**b**) Sistema de medida en THz en laboratorio.

4. Conclusiones

La aplicación de la tecnología de THz junto con las técnicas ISAR permiten la detección de defectos introducidos en troncos de madera que simulan el efecto de la yesca en troncos de vid, este efecto sería el relacionado con una de las hipótesis sobre los mecanismos de la yesca, la del fallo hidráulico. Este fallo hidráulico estaría causado por una reducción de la conductividad hidráulica del xilema, producida por embolias de aire, oclusión de los vasos del xilema por el propio patógeno, o por tílides y geles derivados de la planta [9]. Así, la aplicación de esta tecnología se podría dirigir a la detección temprana de alteraciones en la madera y permitiría tomar decisiones de manejo durante las labores de poda para evitar contaminaciones cruzadas.

En este estudio se han obtenido resultados que muestran sectores huecos o cilindros huecos en el interior de los troncos utilizados para la optimización de los

algoritmos de procesado. Por lo tanto, esta técnica no destructiva es susceptible de ser utilizada en troncos de vides para la detección de la presencia de enfermedades como la yesca.

Funding: Los autores quieren agradecer la financiación por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación, de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y de la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR a través del proyecto TECVID TED2021-130364B-I00.

Referencias

1. Armengol Fortí, J. (2017). Enfermedades fúngicas de la madera de la vid. Una visión general del problema. Enoviticultura, 46, 6–15.
2. Santesteban, L. G., Palacios, I., Miranda, C., Iriarte, J. C., Royo, J. B., & Gonzalo, R. (2015). Terahertz time domain spectroscopy allows contactless monitoring of grapevine water status. Frontiers in Plant Science, 6, 404.
3. Torres, V., Palacios, I., Iriarte, J. C., Liberal, I., Santesteban, L. G., Miranda, C., Royo, J. B., & Gonzalo, R. (2016). Monitoring water status of grapevine by means of THz waves. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 37(5), 507–513.
4. Quemada Mayoral, C., García González, C., Iriarte Galarregui, J. C., Marín, D., Gastón, D. Miranda, C., Gonzalo, R., Maestrojuán, I., Santesteban, L. G., & Ederra, I. (2019). Water content continuous monitoring of grapevine xylem tissue using a portable low-power cost-effective FMCW radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(8), 5595–5605.
5. Krügener, K., Stübling, E.-M., Jachim, R., Kietz, B., Koch, M., & Viöl, W. (2019). THz tomography for detecting damages on wood caused by insects. Applied Optics, 58(22), 6063–6066.
6. Álvarez-Narciandi, G., Laviada, J., & Las-Heras, F. (2020). Freehand mm-wave imaging with a compact MIMO radar. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(2), 1224–1229.
7. Gao, J., Deng, B., Qin, Y., Wang, H., & Li, X. (2016). Efficient Terahertz wide-angle NUFFT-based inverse synthetic aperture Imaging considering spherical wavefront. Sensors, 16(12), 2120.
8. Zhang, B., Pi, Y., & Li, J. (2014). Terahertz imaging radar with inverse aperture synthesis techniques: system structure, signal processing, and experiment results. IEEE Sensors Journal, 15(1), 290–299.
9. Bortolami, G., Gambetta, G. A., Delzon, S., Lamarque, L. J., Pouzoulet, J., Badel, E., Burlett, R., Charrier, G., Cochard, H., Dayer, S., Jansen, S., King, A., Lecomte, P., Lens, F., Torres-Ruiz, J. M., & Delmas, C. E. L. (2019). Exploring the hydraulic failure hypothesis of Esca leaf symptom formation. Plant Physiology, 181(3), 1163–1174. https://doi.org/10.1104/pp.19.00591

Monitorización de la recolección manual del granado mediante detección de movimiento

Fernando Aragon-Rodriguez [1], Carmen Rocamora-Osorio [1,2*], Herminia Puerto [1,2], Ricardo Abadía [1,2]

[1] Dpto. de Ingeniería, Área Agroforestal, Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO), Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel km. 3,2, 03312, Orihuela (Alicante); f.aragon@umh.es (F.A-R.); rocamora@umh.es (C.R-O.); hpuerto@umh.es (H.P.); abadia@umh.es (R.A.).

[2] Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO), Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel km. 3,2, 03312, Orihuela (Alicante); rocamora@umh.es (C.R-O.); hpuerto@umh.es (H.P.); abadia@umh.es (R.A.).

* Correspondencia: rocamora@umh.es

Resumen: La recolección es una de las operaciones agrícolas más importantes, siendo su grado de mecanización variable en función del cultivo, el desarrollo tecnológico y características socioeconómicas de cada zona. Este hecho dificulta la adopción de la agricultura de precisión para una gestión eficiente de los recursos. El objetivo del estudio es clasificar las diferentes acciones que realiza el operario durante la cosecha para así mejorar la gestión de las cuadrillas de recolectores. El ensayo se realizó en una parcela de granado ubicada en el Campus de la EPSO (Orihuela, Alicante), durante octubre de 2024. Los árboles poseían un marco de plantación de 6 x 5 m y puesta en riego por goteo. Para la detección del movimiento se empleó un guante con una placa de Arduino Nano, una unidad de medición inercial (MPU-6050), un sistema de comunicación Bluetooth (DX-BT24-BLE) y una pila de 9V. Con los datos obtenidos se realizó una extracción de características en el dominio del tiempo. Posteriormente, se dividieron los datos en entrenamiento y validación (70/30%) y se entrenaron tres modelos: *decision tree*, *random forest* y *gradient boosting machines*. Los resultados mostraron una exactitud (*accuracy*) global elevada (86-91%), resaltando las características basadas en giros para la clasificación.

Palabras clave: granada; recolección manual; monitorización; movimiento; aprendizaje automático.

1. Introducción

Durante el ciclo de cultivo de las especies con interés agrícola se realizan diversas operaciones para mantener determinadas condiciones agroecológicas y maximizar el rendimiento. Entre estas operaciones está la preparación y el mantenimiento del suelo, la siembra o trasplante, la fertilización, el riego, el control de plagas y enfermedades, y la recolección, entre otros. Los fertilizantes, la siembra y la cosecha suponen un 19-37%, 11-20% y 5-13% respectivamente de los costes de los cultivos extensivos en secano; en regadío el mayor coste es el riego, con un 22-35% del total

[1,2]. Por otra parte, en cultivos intensivos el mayor coste es la recolección, pudiendo alcanzar entre el 25 y 60% del total de los costes de explotación [3,4,5]; asimismo, la recolección aglutina una gran parte de la mano de obra necesaria, por lo que se ha investigado y se han desarrollado equipos y maquinaria para facilitar su mecanización, disminuyendo el coste de la labor [6]. La mecanización de la recolección está facilitando la adopción paulatina de la agricultura de precisión como elemento estructural, así como en la centralización y recogida de datos por medio de los sensores instalados en la propia maquinaria [7].

No obstante, el grado de mecanización varía en función del cultivo, el desarrollo tecnológico, la dimensión de la explotación y las características socioeconómicas de cada zona [8]. Concretamente, hay cultivos, como las frutas y las hortalizas, en las cuales debido a sus características es importante realizar una recolección manual para mantener su calidad comercial, destinándose a la industria de transformación las que se han recogido mecánicamente [6]. Por ello, el avance en el uso de la información para la mejora en la eficiencia y gestión de las explotaciones agrícolas se ha visto retrasado en la producción de frutas y hortalizas.

Paralelamente ha habido un gran desarrollo de la electrónica, reduciendo sus costes y mejorando los materiales y las tecnologías fabricación, dando lugar a dispositivos más asequibles y con menores dimensiones tales como pantallas, sensores, y etiquetas RFID, entre otros. Este hecho junto con el avance del internet de las cosas (IoT) y las telecomunicaciones ha facilitado la incorporación de dispositivos electrónicos en en la agricultura [9,10]. La miniaturización y el empleo materiales flexibles ha posibilitado la creación de sensores "ponibles" o *wearables*, cada vez más empleados en el sector del deporte, la medicina y la salud [9]. Los *wearables* pueden aportar datos útiles para mejorar la eficiencia en las labores agrícolas por parte de los operarios tales como la localización, el comportamiento, y los tiempos y capacidad de trabajo [11,12]. La información así recabada puede servir para la optimización de la asignación de tareas, la determinación de la cantidad de insumos necesarios y la ubicación de los puntos de acopio, entre otros, bajo una estrategia de agricultura de precisión [11,13]. El objetivo de este trabajo es clasificar las diferentes acciones que realiza el operario durante la recolección manual (desplazamiento en campo, corte y recogida de la fruta o transporte de producto) empleando para ello sensores de movimiento y algoritmos de aprendizaje automático con el fin de mejorar la gestión y eficiencia de los equipos de recolección durante la cosecha.

2. Materiales y Métodos

2.1. Parcela de ensayo y adquisición de datos

El ensayo se realizó en una parcela experimental de variedades de granado del Campus de Orihuela (38°04'11.2"N 0°58'56.7"W), donde se ubica la Escuela Técnica Superior de Orihuela (EPSO) (Alicante, España). Se empleó una variedad autóctona sin comercializar (BBE2) puesta en riego por goteo y con un marco de plantación de 6 x 5 m (Figura 1a). Para la recolección se emplearon tres árboles diferentes de dicha variedad, realizando dos recolecciones por árbol en distintas orientaciones y alturas (en cada recolección se recogieron entre 10 y 12 kg de fruta). La recolección manual

de la granada se realizó sujetando con una mano la parte inferior del fruto y realizando el corte de este con unas tijeras de poda (P121-20-F, Bahco, EE.UU.) por la parte superior, a la altura del pedúnculo. La operación de transporte se llevó a cabo con una caja de plástico para fruta de 26 litros y un capazo de 38 litros, transportándose la fruta de manera frontal y cargada al hombro en ambos casos (Figura 1b).

(**a**) (**b**)

Figura 1. (**a**) Variedad empleada para el ensayo de recolección (BBE2); (**b**) Herramientas y útiles para la cosecha.

La detección de la operación realizada por el operario durante la cosecha se caracterizó empleando el movimiento de la mano que realiza el corte del fruto. Para la detección del movimiento se empleó un guante con un microcontrolador (Nano, Arduino S.r.l., Italia), una unidad de medición inercial (IMU) (MPU-6050, TDK Electronics, Alemania), con una frecuencia de muestreo de 100 Hz, un sistema de comunicación Bluetooth (DX-BT24-BLE, DX-SMART Technology Co., China) y una pila de 9 V para el suministro de energía (Figura 2). Se registraron un total de 29.300 datos, 7.000 referentes al desplazamiento sin fruta (23,9%), 17.200 cosechando la granada (58,7%) y 5.100 relativos al transporte de los frutos (17,4%).

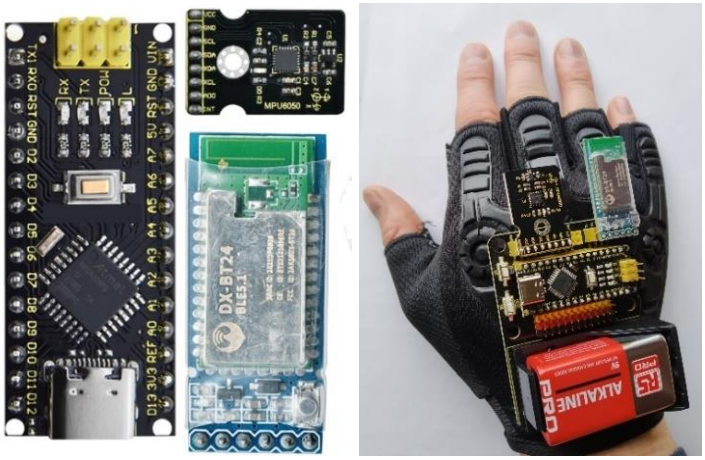


Figura 2. Detalle y montaje de los elementos que forman el dispositivo de detección de movimiento

2.2. Procesamiento de las señales de movimiento

Se obtuvieron 6 características básicas de la IMU: aceleración en el eje X, Y y Z, y tres giros, Pitch (giro en el eje X, entre -90° y +90°), Roll (sentido giro en el eje Y, entre -90° y +90°) y Azimuth (giro en el eje Z, entre 0° y 360°). Posteriormente, se realizó la suma vectorial de la aceleración en los tres ejes (X, Y, Z) para determinar la resultante. Para incrementar el número de características y facilitar la separación en clases se aplicaron una serie de estadísticos de resumen en ventanas de 1 segundo de duración, para cada una de las 7 características básicas. Los estadísticos fueron los siguientes: media, desviación estándar, mediana, rango intercuartíl, asimetría y curtosis, computando un total de 42 características descriptivas en cada categoría. Las ecuaciones de la asimetría (*skewness*) y curtosis (*kurtosis*) pueden verse en la ecuación 1 y 2, respectivamente:

$$Asimetría = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

$$Curtosis = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2\right)^{2}} \quad (2)$$

Donde:

x_i: valores de la variable
$\bar{x}$: media de los datos
N: número total de observaciones

2.3. Entrenamiento, evaluación e interpretabilidad

Los algoritmos empleados estuvieron basados en árboles siendo estos: árbol de decisión (*decision tree*, DT), *Random Forest* (RF) y *Gradient Boosting Machines* (GBM). Dichos algoritmos se entrenaron en el conjunto de entrenamiento, siendo éste un 70% de los datos, perteneciendo el restante (30%) al colectivo de validación, preservándose la proporción de clases para ambos conjuntos. Para el entrenamiento y la selección de los hiperparámetros se utilizó validación cruzada con 4 particiones (*k-4-folds*). El entrenamiento y la validación de los modelos se llevó a cabo con el paquete *caret* [14].

Para la evaluación de la clasificación en los diferentes grupos se tuvieron en cuenta las siguientes métricas:

- *Accuracy* (Exactitud). Mide la proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones realizadas. Su fórmula se indica en la ecuación 3:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3)$$

- *Precision* (Precisión). Indica qué proporción de los casos predichos como positivos son realmente positivos. Sigue la expresión de la ecuación 4:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

- *Recall* (Sensibilidad). Mide la capacidad del modelo para detectar los casos positivos reales. Se expresa según la ecuación 5:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

- *F1 Score* (Puntuación F1). Es la media armónica entre la precisión y el *recall*. Sigue la ecuación 6:

$$F1\ Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (6)$$

Donde:

TP (*True Positives*): Verdaderos Positivos
TN (*True Negatives*): Verdaderos Negativos
FP (*False Positives*): Falsos Positivos
FN (*False Negatives*): Falsos Negativos

La determinación de la importancia de las variables o características (*features*) dentro de cada modelo se realizó utilizando la técnica de importancia de características por permutación (*Permutation Feature Importance, PFI*), en la cual se mide el aumento del error de predicción del modelo después de permutar los valores de la característica. Dicha característica es importante si al remuestrear sus valores aumenta el error del modelo, siendo poco importante si el error del modelo no cambia [15]. Para ello se empleó el paquete *iml* [16].

3. Resultados y discusión

En la Figura 3 se muestra un esquema del modelo de árbol de decisión. Se indica que el modelo posee una profundidad de cuatro niveles. La característica más importante está basada en el Azimuth, tanto en sus valores medios como en la mediana, seguido de la media y la asimetría de la distribución de la aceleración en el eje Y. Además, en el último nivel se encuentra la media del Pitch. Atendiendo a los nodos hoja o terminales se indica que la pureza de la mayoría es alta, prácticamente total, salvo en el caso de "andando sin fruta" del nivel 3, por lo que el modelo es capaz de diferenciar con bastante certeza cada una de las clases. Este algoritmo es sencillo, rápido y de fácil implementación mediante programación empleando controles de flujo con *if-else* anidados, optimizando la ejecución y la memoria en sistemas embebidos y su inferencia en tiempo real [17].

En la Figura 4 se observa la matriz de confusión de cada uno de los tres modelos (DT, RF y GBM) con las clases de referencia y la predicción de estos. La diagonal que

va desde la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha indica la cantidad de instancias predichas correctamente.

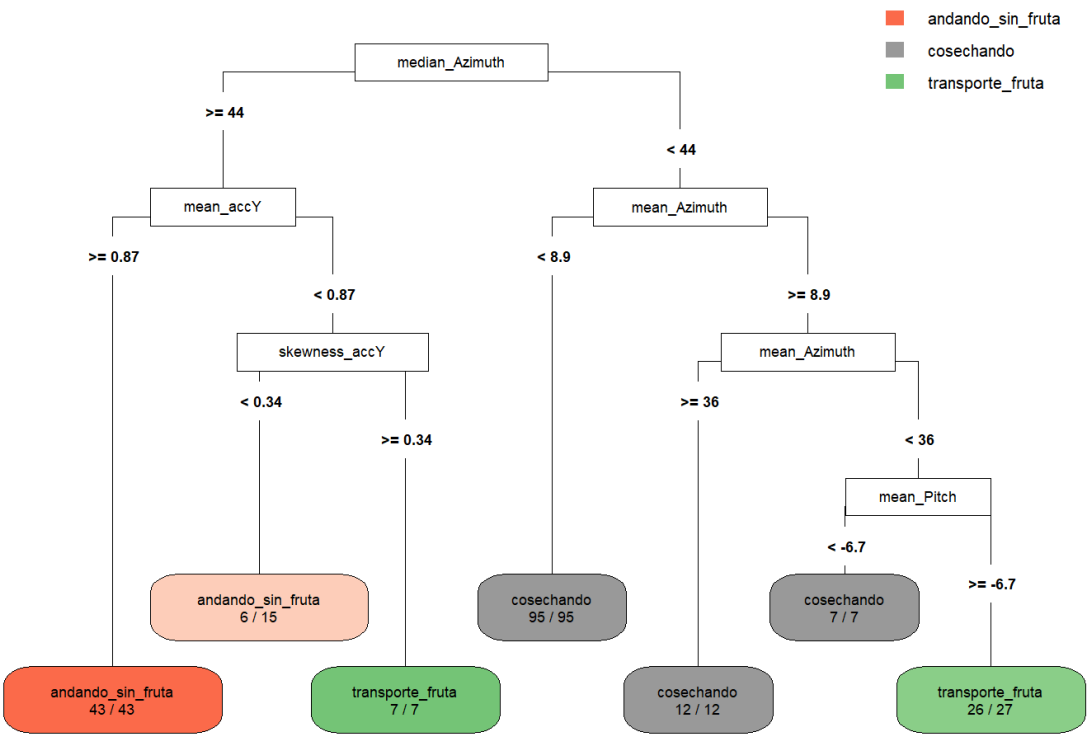
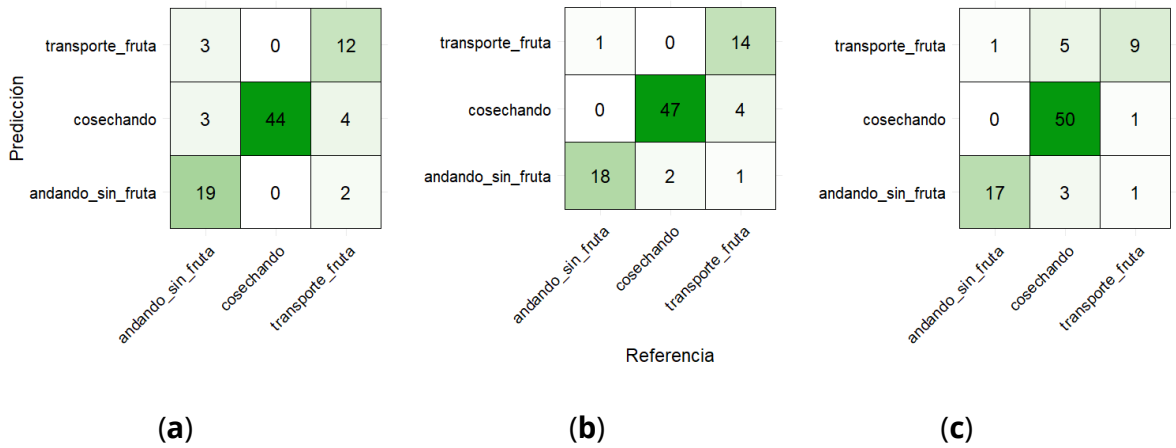


Figura 3. Esquema de reglas del árbol de decisión entrenado



(**a**) (**b**) (**c**)

Figura 4. Matriz de confusión para el conjunto de validación**:** (**a**) Árbol de decisión; (**b**) *Random Forest*; (**c**) *Gradient Boosting Machines*.

Los resultados relativos a las métricas de evaluación del conjunto de validación de los diferentes modelos entrenados pueden verse en la Tabla 1. Esta tabla añade más información respecto a la matriz de confusión de la Figura 4. Se observa que el modelo con mayor desempeño es *Random Forest*, con un valor más alto de exactitud (*accuracy*) y puntuación F1 (*F1 Score*) para las tres clases. La clase mejor predicha

para los tres modelos es "cosechando" siendo la peor el "transporte de fruta" con una situación intermedia para la clase "andando sin fruta". Esto puede ser debido a la menor representatividad que poseen estas dos últimas clases en el conjunto de datos. Algunas técnicas para minimizar este efecto es el equilibrio de clases mediante datos sintéticos o el incremento de los pesos en el entrenamiento de los algoritmos para las clases minoritarias [18,19]. Cabe destacar la precisión de 1,0 para la clase "cosechando" con el modelo de árbol de decisión, por lo que no hay falsos positivos (error tipo I), y la sensibilidad (*recall*) para el modelo de *Gradient Boosting Machines*, la cual es muy alta, de 0,98 para la misma clase, con muy pocos falsos negativos (minimizando los errores tipo II). El modelo de RF es el que equilibra mejor ambos errores en dicha clase, siendo un algoritmo ampliamente utilizado, flexible, con un buen rendimiento y capaz de lidiar con estructura de datos complejas y de alta dimensión [20]. Otros autores lograron alcanzar similares valores de exactitud (86%) usando redes neuronales y sensores acoplados a las bolsas de recogida de aguacate que se emplean para la recolección manual [13].

Tabla 1. Métricas de evaluación en el conjunto de validación de los modelos entrenados

Modelo[1]	**Clase**	***Accuracy***	***Precision***	***Recall***	***F1 Score***
Árbol de decisión	Andando sin fruta	0,862	0,760	0,905	0,826
	Cosechando		1,000	0,863	0,926
	Transporte de fruta		0,667	0,800	0,727
Random Forest	Andando sin fruta	**0,908**	0,947	0,857	**0,900**
	Cosechando		0,959	0,922	**0,940**
	Transporte de fruta		0,737	0,933	**0,824**
Gradient Boosting Machines	Andando sin fruta	0,874	0,944	0,810	0,872
	Cosechando		0,862	0,980	0,917
	Transporte de fruta		0,818	0,600	0,692

[1] Random Forest: num.trees = 500, splitrule = gini, mtry = 33, min.node.size = 1;

Gradient Boosting Machines: n.trees = 150, interaction.depth = 2, shrinkage = 0,1, n.minobsinnode = 10

La figura 5 indica la importancia relativa (%) de las características más relevantes para cada modelo entrenado. Aunque los árboles de decisión son modelos interpretables por su propia construcción, los algoritmos RF y GBM son de tipo "caja negra", por lo que es necesario técnicas o procedimientos para poder ser interpretados [21]. Se observa que el valor de la media/mediana del Azimuth es importante para los tres modelos, siendo más del 80% para DT y las únicas características importantes para RF (100%). Por otro lado, la característica que representa la media del Roll es casi el 90% en GBM. Por consiguiente, el ángulo de inclinación en los diversos ejes es crucial para la determinación de la actividad en la cosecha.

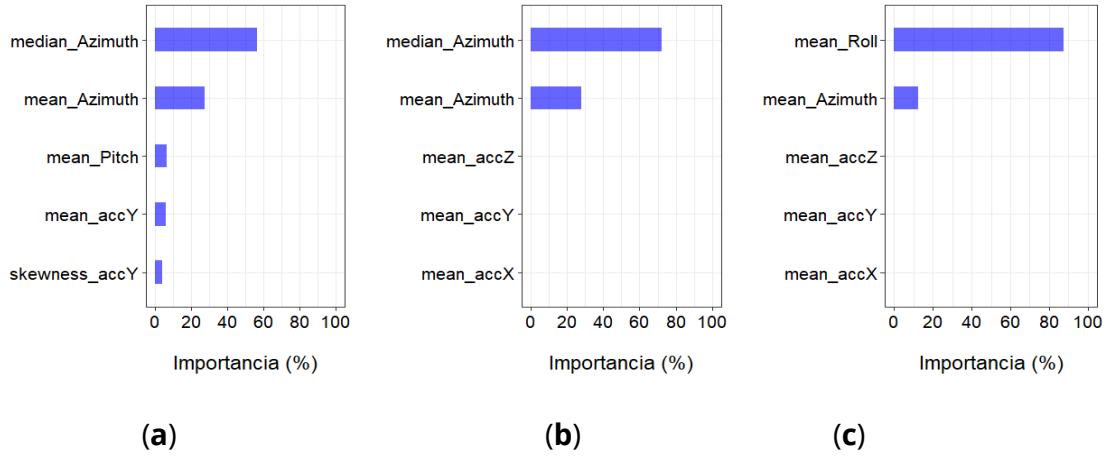


Figura 5. Importancia de las variables según PFI para cada modelo**:** (**a**) Árbol de decisión; (**b**) *Random Forest*; (**c**) *Gradient Boosting Machines*.

4. Conclusiones

El empleo de sensores acoplados a los operarios, denominados *wearables,* basados en el movimiento de la mano durante la recolección manual y su análisis mediante aprendizaje automático permite discernir entre las diferentes actividades que se realizan durante la cosecha con un alto grado de certidumbre. Este resultado permite determinar tiempos y capacidades de trabajo, así como mejorar la gestión de los recursos humanos y los insumos. Se plantean futuros ensayos para la recopilación de una mayor cantidad de datos provenientes de diferentes operarios durante la campaña de recolección próxima, así como el diseño de una versión más compacta y robusta del dispositivo de detección de movimiento, pudiendo añadir algún elemento de recogida de datos en las tijeras de poda y un modelo de computación en el borde.

Contribución de los autores: Conceptualización, F.A-R y C.R.-O; metodología, F.A-R y C.R.-O; software, F.A-R; validación, F.A.-R. y C.R.-O.; análisis formal, F.A.-R.; investigación, F.A-R, H.P. y C.R.-O, recursos, H.P. y C.R.-O.; tratamiento de los datos, F.A-R. y C.R.-O.; redacción-preparación del borrador original, F.A-R. y C.R.-O.; redacción-revisión y edición, F.A-R, H.P. y R.A.; visualización, F.A-R; supervisión, H.P. y R.A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del artículo.

Financiación: Esta investigación no ha recibido financiación externa.

Agradecimientos: A la Escuela Técnica Superior de Orihuela (EPSO) por la cesión de parte del banco de variedades de granado para la realización de los ensayos, en especial a Juan José Martínez Nicolás por su predisposición y diligencia.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Lloveras Vilamanyà, J.; Cabasés i Piqué, M. À. Costes de producción de cultivos extensivos en secano y regadío. 2015.
2. MAPA. Resultados técnico-económicos de cereales 2018. ECREA 2.0. Subdir. Gral. Anál. Coord. Estad. Subsec. Minist. Agric. Pesca Aliment. 2023.

3. AEMO. Estudio de costes del cultivo del olivo. 2023. Disponible en: https://www.aemo.es/slides/slide/estudio-aemo-de-costes-cultivo-olivo-2023-266/download (accedido el 24 de marzo de 2025).
4. Fernández-Zamudio, M. A.; Bartual, J. Panorama actual del cultivo del granado: Evolución de las prácticas culturales y los costes. Rev. Vida Rural 2020, 18, 12-17.
5. Malagón, J. Cultivo de la cereza. Serv. Transfer. Tecnol. Moncada 2024. Disponible en https://portalagrari.gva.es/documents/366567370/373115001/CULTIVO+del+CEREZO.+Ficha+T%C3%A9cnica.+pdf.pdf/
6. (accedido el 24 de marzo de 2025).
7. Villalobos, F. J.; Fereres, E. Harvest and conservation. In Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 487-501.
8. Finger, R.; Swinton, S.; Benni, N.; Walter, A. Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. Annu. Rev. Resour. Econ. 2019. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-RESOURCE-100518-093929.
9. Paustian, M.; Theuvsen, L. Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. Precis. Agric. 2016, 18. https://doi.org/10.1007/s11119-016-9482-5.
10. Han, S. T.; Peng, H.; Sun, Q.; Venkatesh, S.; Chung, K. S.; Lau, S. C.; Roy, V. A. L. An overview of the development of flexible sensors. Adv. Mater. 2017, 29, 1700375.
11. Kim, D.; Zarei, M.; Lee, S.; Lee, H.; Lee, G.; Lee, S. G. Wearable Standalone Sensing Systems for Smart Agriculture. Adv. Sci. 2025, 2414748.
12. Ampatzidis, Y. G.; Vougioukas, S. G.; Whiting, M. D. A wearable module for recording worker position in orchards. Comput. Electron. Agric. 2011, 78, 222-230.
13. Arrais, A.; Dias, D.; Cunha, J. P. S. Novel Real-time Metrics for Quantified Vineyard Workers' Operations with Wearable Devices. IEEE 7th Port. Meet. Bioeng. 2023, 92-96.
14. Dabrowski, J. J.; Rahman, A. Fruit Picker Activity Recognition with Wearable Sensors and Machine Learning. Int. Jt. Conf. Neural Netw. (IJCNN) 2023.
15. Kuhn, M.; Wing, J.; Weston, S.; Williams, A.; Keefer, C.; Engelhardt, A.; R Core Team. Package 'caret'. R J. 2020, 223, 48.
16. Molnar, C. Interpretable Machine Learning. Lulu, 2020.
17. Molnar, C.; Giuseppe, C.; Bernd, B. iml: An R package for interpretable machine learning. J. Open Source Softw. 2018, 3, 786
18. Chen, K. H.; Su, C.; Hakert, C.; Buschjäger, S.; Lee, C. L.; Lee, J. K.; Chen, J. J. Efficient realization of decision trees for real-time inference. ACM Trans. Embed. Comput. Syst. 2022, 21, 1-26.
19. Huang, C.; Li, Y.; Loy, C. C.; Tang, X. Learning Deep Representation for Imbalanced Classification. Comput. Vis. Pattern Recognit. 2016, 5375-5384. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.580.
20. Mustapha, M. T.; Ozsahin, D. U. Class imbalance and its impact on predictive models for binary classification: A comparative analysis. Elsevier BV 2024, 389-408. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95462-4.00014-5.
21. Scornet, E.; Biau, G.; Vert, J. Consistency of Random Forests. Ann. Stat. 2014, 43. https://doi.org/10.1214/15-AOS1321.
22. Konstantinov, A. V.; Utkin, L. V. Interpretable machine learning with an ensemble of gradient boosting machines. Knowl.-Based Syst. 2021, 222, 106993.

PARTE 3

DIGITALIZAÇÃO

DIGITALIZACIÓN

Índice

Selection of Coffee Beans (Coffea arabica) Using Machine Learning Based on Optical and Acoustic Properties. 223

Ações do projeto DigiFarm2all para incentivar a digitalização nas culturas permanentes em Portugal – o caso particular do olival 237

Diferencias en el reverdecimiento primaveral de especies de césped para áreas verdes en clima mediterráneo continental semiárido 245

Modelización del secuestro de carbono en plantaciones de higuera mediante teledetección 259

Using Digital Platforms for Knowledge Transfer: Insights from the NEGHTRA Project 268

Selection of Coffee Beans (*Coffea arabica*) Using Machine Learning Based on Optical and Acoustic Properties.

Juan Roberto Mora Chaves [1], Belén Diezma [2] and Eva Cristina Correa [3]

[1] PhD Student, Higher Technical School of Agricultural, Food and Biosystems Engineering; Universidad Politécnica de Madrid; juanroberto.mora@alumnos.upm.es

[2] Department of Agroforestry Engineering; Universidad Politécnica de Madrid; belen.diezma@upm.es

[3] Department of Food Chemistry and Technology, Universidad Politécnica de Madrid; evacristina.correa@upm.es

Correspondence: juanroberto.mora@alumnos.upm.es

Abstract: Coffee is one of the most highly valued agricultural products globally, the accurate bean selection is a critical factor for commercialization. This study analyzes the acoustic and optical properties to detect parchment coffee. A total of 4 000 healthy *Coffea arabica* beans were examined; 3 000 were green beans (hulled and polished) and 1 000 parchment coffee. Green beans were further divided into three groups of 1 000 each, based on sizes: 14/64", 17/64", and 20/64". Optical properties were measured using a LabSpec® 4 spectrometer, which records the reflectance of wavelengths between 350 and 2 500 nm. The spectrum for each of the 4 000 samples was recorded at a single point located on the intermediate section of the convex side. Acoustic properties were determined by analyzing the sound emitted when each sample collided three times with a stainless-steel plate. Periodograms were then generated from the acoustic recordings to determine the power of frequencies ranging from 0 to 25,600 Hz. Both reflectance values and acoustic spectrum data were each independently used as features to train separate classification models. The optical-based model (Fine Gaussian SVM) achieved the highest performance, with an accuracy of 99,75%, outperforming the acoustic model (Bilayer Neural Network), which achieved 98,88%.

Keywords: Quality, Coffee processing, Non-Destructive Techniques, Spectroscopy, Parchment coffee.

1. Introduction

Coffee is one of the most consumed beverages and is widely traded around the world. The quality of the coffee is quite important for establishing the prices of lots, and this quality could be affected through the process. After being collected cherry fruits can be processed in two different ways. In "dry way processing" cherry fruits are dry in their entire form using principally sun energy. When fruits are already dried, they are peeled to get the green coffee beans. In "wet way processing" there is a pulping operation which consists of removing the peel and the pulp. This pulp

could be removed mechanically or via fermentation and washing; the result is parchment coffee which is dry with industrial driers and then stored [1].

After this storage, a hulling process is required to get the green coffee beans, this process involves breaking and removing the hull (endocarp) and the "silver skin" that covers the grains (perisperm). During hulling some beans may break and a portion of the parchment coffee can pass through the machine, requiring removal during the subsequent classification process. Removing parchment coffee and other contaminants before roasting is essential to prevent unwanted flavors and the selection of standard sizes is important to uniform the roast[2].

Sorting machines separate grain sizes using screens and vibration. At the end of the line, modern sorting machines employ non-destructive techniques to differentiate beans from contaminants based on their optical properties. However, this technology has certain limitations, such as pixel size and potential spectral similarities between beans and contaminants [3].

Nondestructive techniques have been developed since the decade of 1920´s [4], in grain products, these have been used a wide range of technologies to detect different quality parameters[5]. Acoustic properties have multiple applications in quality evaluation [6], it has been studied for more than 40 years [7]. Some studies found possible applications in grain industry, it has been used to detect empty shells [8] [9], damaged grains by insect attacks [10] [11][12], infestations[13] [14] [15], contaminated lots [16] and different types of grains[17]; in coffee process it also is being used to control the roasting process [18][19].

The objective of the article is to evaluate the feasibility of non-destructive techniques for the identification of parchment coffee. Specifically, this work focuses on the analysis of the acoustic and spectroscopic properties of green coffee beans.

2. Materials and Methods

2.1. Samples description

The coffee beans examined in this study were *Coffea arabica*, they were harvested and processed in the central region of Costa Rica. A total of 4 000 healthy beans were examined; of these, 3 000 were green beans (hulled and polished), while 1 000 were parchment beans. The green beans were further divided into three groups of 1 000 each, based on screen sizes of 14/64" (C14), 17/64" (C17), and 20/64" (C20) (figure 1). Before the test the humid content of three samples of the 4 lots were determined by applying the oven method [20] at 103 °C for 24 h. 10 g per sample were weighted using a scale Scaltec SBA 32 (± 0,001 g).

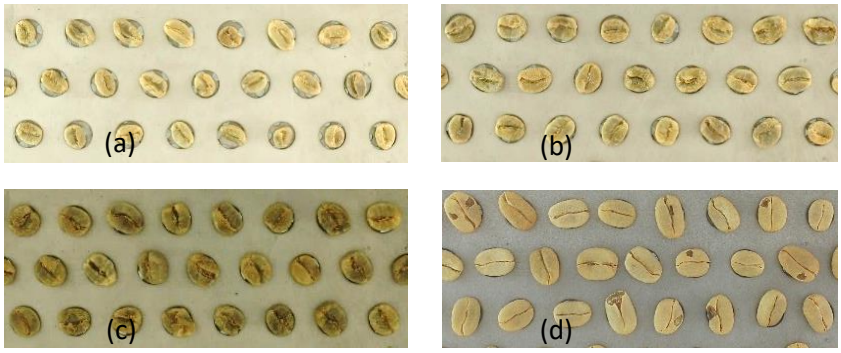


Figure 1. Samples of green coffee size C14 (a), C17 (b), C20 (c) and parchment coffee (d).

2.2. Optical properties

Optical properties were measured using a LabSpec® 4 standard spectrometer with an optical probe of 0,6 cm external diameter, which records the reflectance of wavelengths between 350 and 2 500 nm each 1 nm. The spectrum for each of the 4 000 samples was recorded at a single point located on the intermediate section of the convex side. The measurements were performed inside a dark capsule to avoid external light interference (figure 2).

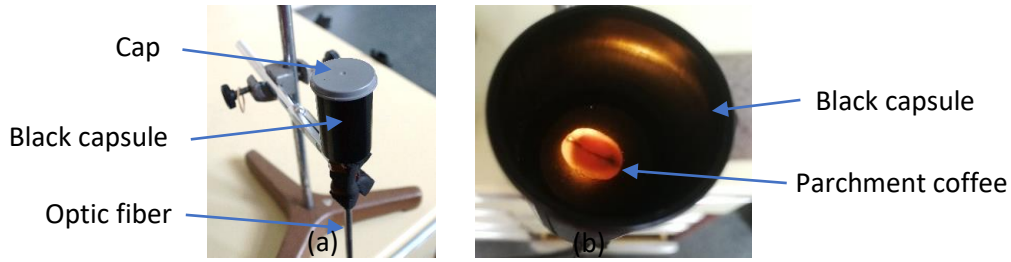


Figure 2. Black capsule for spectral acquisition, external view (a) and internal view (top view) with the parchment coffee positioned and illuminated by the optic fiber (b).

2.3. Acoustic properties

Acoustic properties were determined by analyzing the acoustic emission (AE) when each sample collided with a stainless-steel plate (150 x 150 x 1,4 mm) placed on an elastomeric foam panel (150 x 150 x19 mm) at a 45° angle. Each bean was dropped one by one three times and the free fall distance was 151 mm. The microphone was placed approximately 52 mm from the impact zone (figure 3).

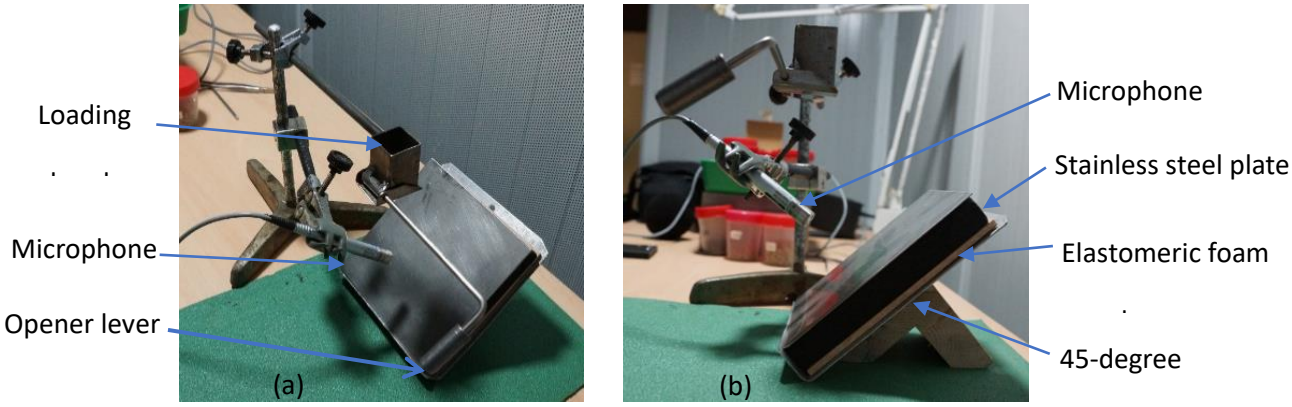


Figure 3. Acoustic set configuration. Top view (a) and side view (b)

Sounds were recorded inside an acoustic isolated room using a microphone Brüel & Kjær, type 4189-A-021 with a preamplifier type 2669L. This microphone was connected to a conditioning amplifier Brüel & Kjær model Nexus (amplifier set up 316 mV/Pa, transducer set up 49,691 mV/Pa). The amplifier was connected to an analog to digital signal transductor, National Instruments model Ni cDAQ-9174 which was connected to a laptop. The signal was recorded using the App Analog Input Recorder of MATLAB v2024, the scan rate was set to 51 200 scan per second. After recording the data was reduced to 471 data (equivalents to 9,20 ms) finding the position of maximum amplitude and then selecting data from 50 positions before and 420 positions after of the maximum amplitude. The function periodogram of MATLAB was applied to the acoustic records (V) and generate periodograms (V^2/Hz) which determine the power of frequencies ranging from 0 to 25 600 Hz.

2.4. Data analysis

A Principal Component Analysis (PCA) test was applied and then a Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) was applied to the scores to segregate the samples. Then using the coordinates of axes canonical 1 and 2 and the function Silhouette of MATLAB, the mean Silhouette value was calculated to analyze the clustering consistency. This index measures how similar a point is to points in its cluster when it is compared to points in other clusters. Values range from –1 to 1. A high silhouette value indicates that a point is well matched to its own cluster, and poorly matched to other clusters. This index is calculated by formula 1

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} s(i) \qquad (1)$$

Where N is the total number of data set and s(i) is the index for each point and is calculated by formula 2.

$$s(i) = \frac{b(i)-a(i)}{\max(a(i),b(i))} \qquad (2)$$

Where the cohesion a(i) is the average distance from i to all other points in the same cluster and the separation b(i) is the average distance from i to all points in the nearest neighboring cluster. Both are calculated by formulas 3 and 4 respectively.

$$a(i) = \frac{1}{|C|-1} \sum_{j \in C, j \neq 1} d(i,j) \qquad (3)$$

$$b(i) = \frac{1}{|C'|} \sum_{j \in C'} d(i,j) \qquad (4)$$

where C is the cluster to which i belongs and d(i,j) is the distance between points i and j, and where C' is any cluster different from C.

The reflectance and acoustic spectrum values were used as predictive parameters to generate separate classification models to predict if it´s green or parchment coffee. To simplify the models, the features were analyzed applying Principal Component Analysis (PCA) and Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR) analysis. In total there were used 34 types of classification models of the Classification Learner Toolbox of MATLAB: Decision trees, Discriminant, Regressions, Supporting Vector Machine (SVM) Naïve Bayes, K Nearest Neighbors (KNN) and Neural Network, between others.

Ninety percent of data was used to train models, the rest ten percent were separated for testing. To avoid overfitting models, test sets were created using cross validation and separating data into five folds.

The selection of the best models was made considering the accuracy, the precision and the prediction speed. There was assigned a value of 47,5 points for the accuracy, 47,5 for the precision to identify parchment coffee and 5 points for time of process. The speed was evaluated with 1 000 data and time (average of 3 repetitions). Models under 95% accuracy in the validation were discarded.

The total score of the algorithm was calculated with the following formula:

$$Tsc = Ac * 47{,}5 + \mathrm{Ppc} * 47{,}5 + 5 * (1 - Tp) \qquad (5)$$

Where:

Tsc: Total score.

Ac: Accuracy of the validation (decimal base).

Ppc: Precision to identify parchment coffee (decimal base).

Tp: Time of process of 1 000 data (s).

The Precision to identify parchment coffee (Ppc) was determined by formula 6:

$$Ppc = \frac{Pc\ id}{Tpc} \qquad (6)$$

Where:

Pc id: total of beans identified as parchment coffee.

Tpc: total of parchment coffee beans.

3. Results

3.1. Samples description.

Table 1 summarizes the results of humid content (CH) of the samples. An ANOVA test was applied to verify significant differences between lots. There is no significant difference between grains C14 and C17, but these two samples present significant difference with sample C20 and parchment coffee 1. Despite this difference, it is considered that it has no effect on acoustic and optical results because the maximum difference between green coffee is less than 0,5 percentage points and the maximum difference between parchment and green coffee is around 1 percentage point.

Table 1. Humid content of samples.

Coffee bean	Screen size	Size	N	Mean humid content (wet basis)	Standard deviation
Green	14/64”	C14	3	10,38% [A]	0,16%
Green	17/64”	C17	3	10,59% [A]	0,11%
Green	20/64”	C20	3	10,17% [B]	0,26%
Parchment	sd	sd	3	9,26% [C]	0,04%

Note: Means with different letters indicate significant differences p<0,05.

3.2. Optical properties.

Figure 4 shows the relative reflectance of samples, the shape and the values of the mean reflectance curve are very similar for green coffee sizes C14, C17 and C20; nevertheless, comparing the parchment and green coffee, there are differences in different sections of the spectrum. The similarities between patterns of green coffee confirm that there is no effect on optical properties because of few differences of CH.

Applying MRMR, figure 5 illustrates 40 of the 2151 wavelengths which are used as predictive features by the machine learning algorithm. The flat shape of the entire

curve indicates redundancy between features, the most relevant wavelength is 2175 nm (importance score 0,5509) and 1101 nm is the least relevant (importance score 0,3196). In figure 4 are resalted the first 7 wavelength identified by the MRMR method, starting with the visible region, there is an evident difference in the wavelength 509 and 668 nm; difference near 600 nm is associated to the presence and concentration of phenolic compounds in green coffee, especially chlorogenic acids [21][22]. The three green coffee samples exhibit absorption in this region, unlike parchment coffee, which has a phenolic-compound-poor coating [23], meaning its spectrum in this area does not show an absorption peak.

The section between 1400 - 2 350 nm the differences are associated to the difference in water content (1400 and 1940 nm) and the higher content of carbohydrates (2080 nm) and lipids (2 320 and 2 350 nm) in green coffee in contrast to the hull of the parchment coffee which is a fibrous material with higher content of cellulose [24].

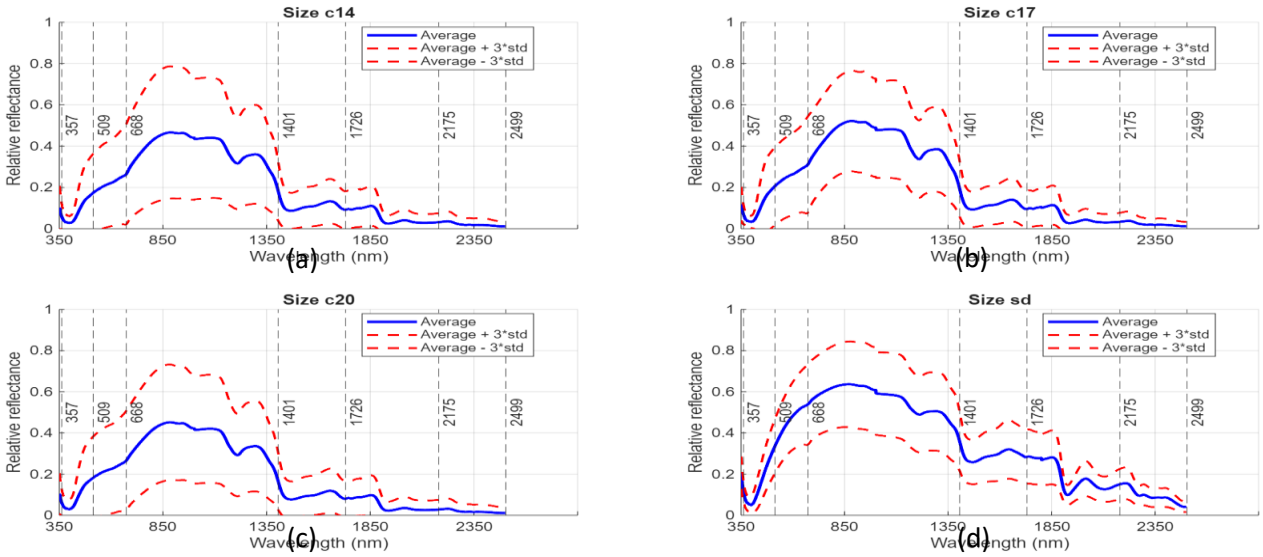


Figure 4. Graphs of relative reflectance of samples. Green coffee sizes 14 (figure a), 17 (figure b) and 20 (figure c) and parchment coffee (figure d)

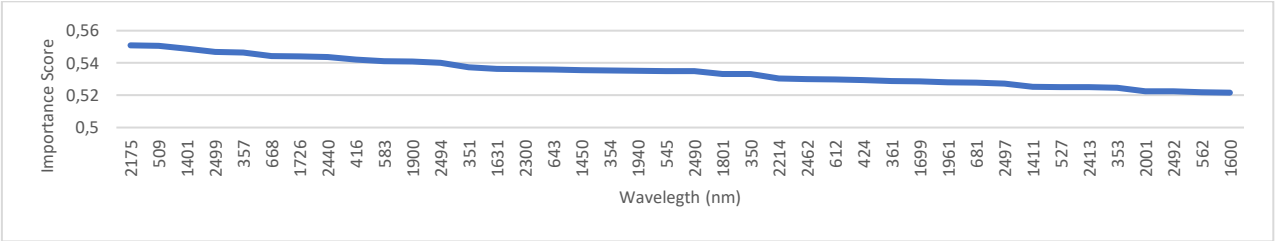


Figure 5. Feature importance scores sorted using MRMR algorithm. Show the first 40 of 2151 wavelengths.

Applying PCA were noted that wavelength between 1400 – 1410 nm are the most relevant for component 1. Together component 1 and component 2 explain 95,59

% of variance; 86,97% component 1 and 8,62 % component 2. Figure 6.a shows the coordinates of samples in space component 1 and component 2; the value of 0,80 of the silhouette's index indicates a good clustering of data. This clustering is even more evident after applying the MANOVA on the scores (figure 6.b).

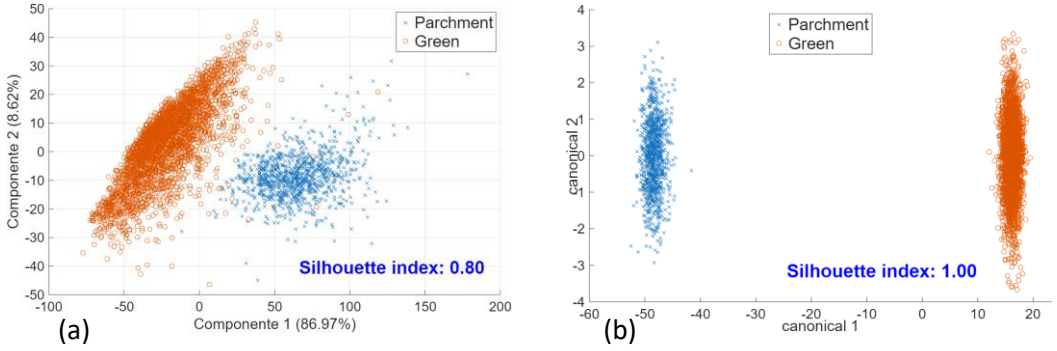


Figure 6.(a) Cases' coordinates by reflectance after applying the PCA. Component 1 and Component 2 explain 86,97 % and 8,62 % of variance respectively. (b) Coordinates of Canonical 1 and Canonical 2 axes after applying a MANOVA on the scores of the PCA of the reflectance.

3.3. Optical models.

Figure 7 resumes the total scores of the models obtained with optical properties, in this case it was possible to reduce the number of features from 2151 to 1 using the wavelength 2175 nm. All the models except Boosted Trees, Cosine KNN, SVM Kernel and Logistic Regression Kernell overpassed the 95% of accuracy, the best result was achieved by Fine Gaussian SVM (Tsc= 99,32) 99,75% of accuracy on validation and 99,75% on test, and the Tp was 27,43 ms.

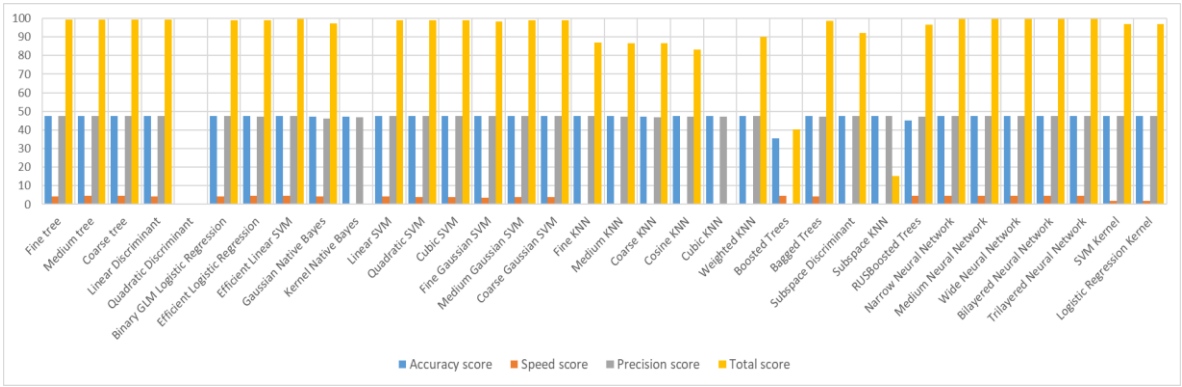


Figure 7. Scores of optical models using 1 feature (2175 nm).

Images 8.a shows the true positive rates (TPR) and the false negative rates (FNR) and image 8.b shows the positive predictive values (PPV) and the false discovery rates (FDR) for the validation, this result evidence that 99,1 % of the parchment was correctly classified and 100% of the green coffee was correctly classified.

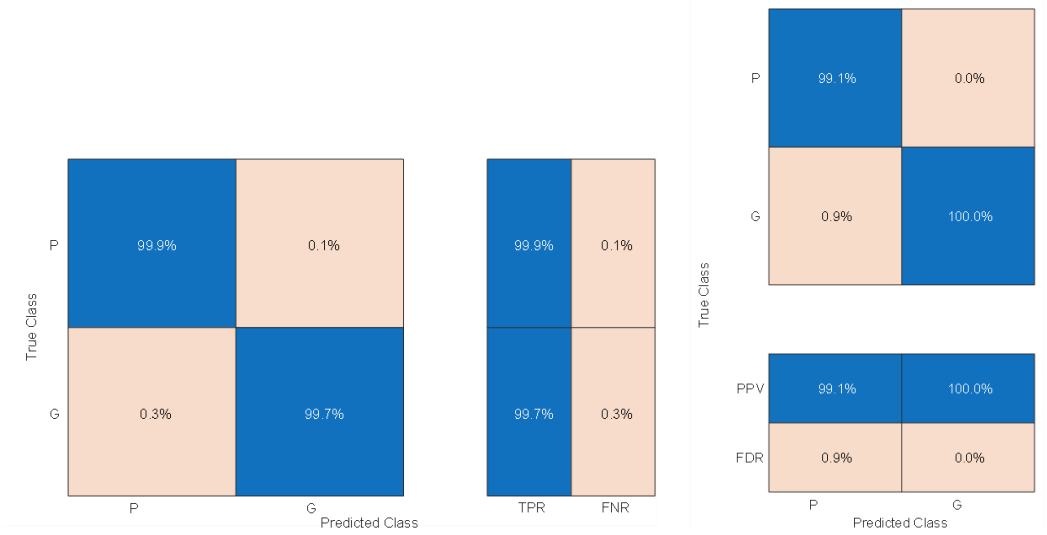


Figure 8. Validation matrix. True Positive Rates (TPR) and False negative rates (FNR) (a), Positive Predictive Values (PPV) and False Discovery Rates (FDR) (b) of the optical model using one feature. Trained and evaluated with 3 600 and 400 observations respectively. P and G refer to parchment coffee and green coffee, respectively.

3.4. Acoustic data.

Figure 9 shows the acoustic periodograms of green coffee and parchment coffee. Overall, the image reveals few differences between the patterns of green coffee of different sizes. It seems that neither size nor slight variations in moisture content have a clear effect on the acoustic spectrum of these three samples. This image also highlights an evident difference in the patterns of parchment and green coffee that could be associated with the presence of hull in parchment coffee.

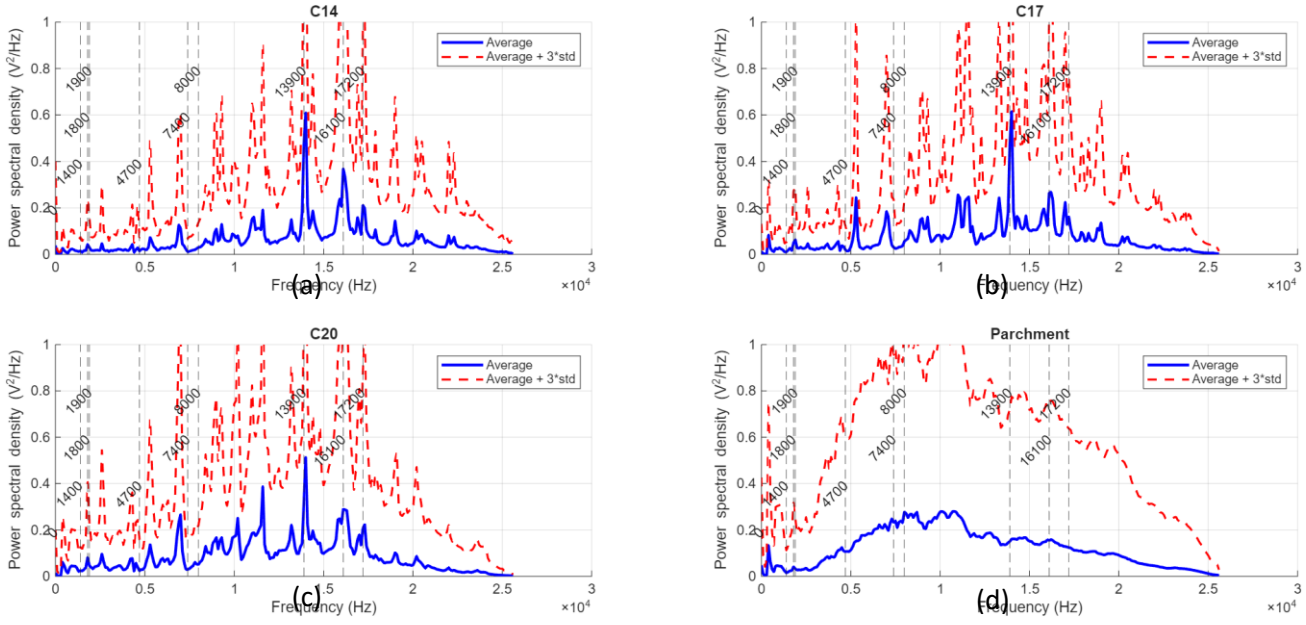
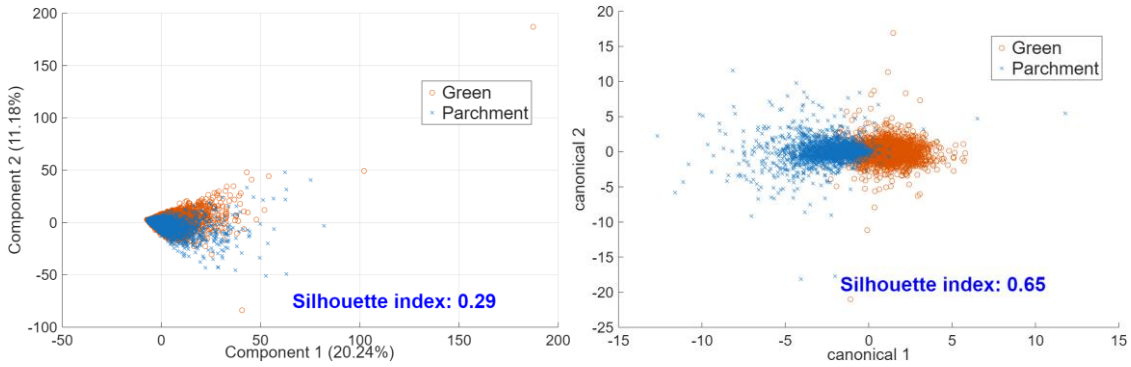


Figure 9. Acoustic power spectral density normalized. Green coffee sizes 14 (figure a), 17 (figure b) and 20 (figure c) and parchment coffee (figure d).

After applied a PCA it was determined that principal component 1 explains 20,24% and component 2 11,18%; there are necessary 117 of 257 Components to explain 95% of variance. Image 10 shows the clustering of cases using the two first components of the PCA as axes (a) and using the two first canonical axes after applying a MANOVA (b). The degree of clustering is improved after applying MANOVA the Silhouette increased from 0,29 to 0,65; despite the degree of clustering is better in optical properties this value of the Silhouette index is considered good, and it allowed to train classification models with a satisfactory performance.



(a) (b)

Figure 10.(a) Cases' coordinates by acoustic emission after applying the PCA. Component 1 and Component 2 explain 20,24 % and 11,18 % of variance respectively. (b) Coordinates of Canonical 1 and Canonical 2 axes after applying a MANOVA on the scores of the PCA of the reflectance.

3.5. Acoustic models.

Figure 11 compares the models tested for the acoustic property with 257 features as predictors. The best result was reached by a Bilayer Neural Network (Tsc 98,46), this model achieved a 98,88% accuracy on validation and 99,0% in the test with Tp of 11,77 ms for 1000 data. Figure 12 shows the validation matrix of this model; in the positive predictive values matrix (figure 12.b) it is noted that the precision to identify parchment coffee is 98,0% and the precision to identify green coffee is 99,2%.

Using 257 features, 16 of the 34 models were discarded because they did not reach 95% of accuracy. After applying MRMR (graph not shown) it was necessary to use 10 features (7400; 13900; 0; 1400; 1800; 4700; 17200; 8000; 16100 and 1900 Hz) to achieve 95%. In this case a Narrow Neural Network got 95,2% in the validation and 94,9% in the test. The identification of key acoustic frequencies is important not only to simplify the model, it also could help to design and apply filters to the records.

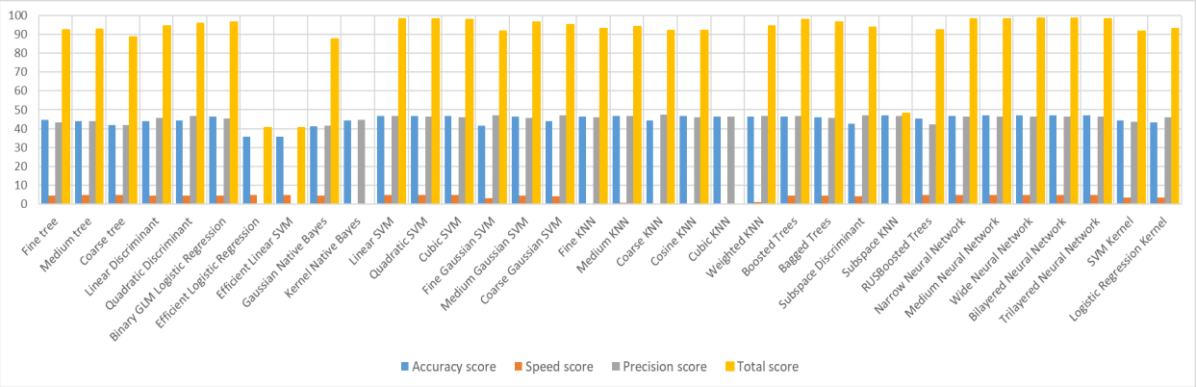


Figure 11. Scores of acoustic models with 257 features.

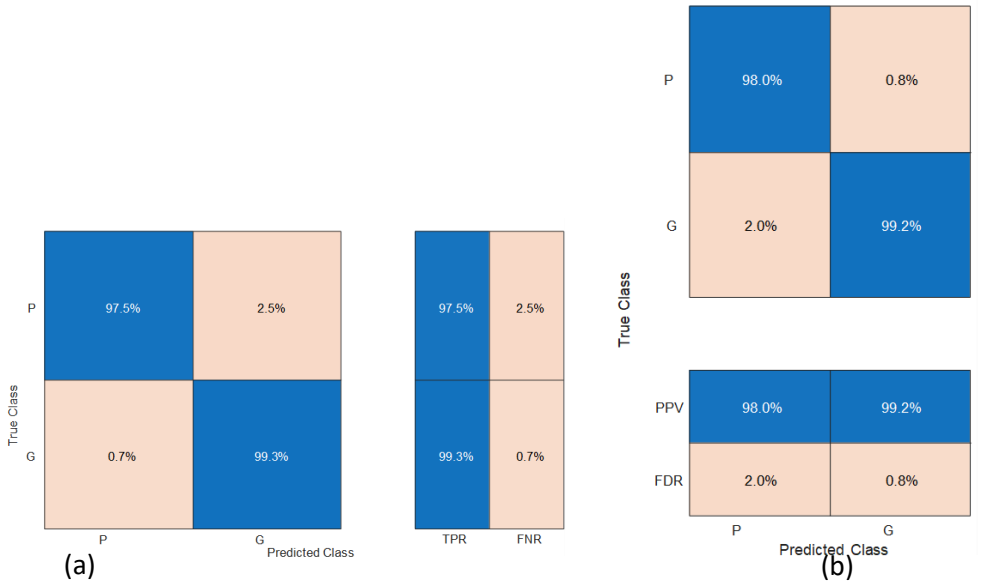


Figure 12. Validation matrix. Validation matrix. True Positive Rates (TPR) and False negative rates (FNR) (a), Positive Predictive Values (PPV) and False Discovery Rates (FDR) (b) of the acoustic model using 257 features. Trained and tested with 10 788 and 1 198 observations respectively.

4. Discussion

The similar patterns in reflectance index and acoustic spectral density across green coffee sizes suggest that size and minor CH differences were not significant, whereas the hull in parchment coffee was the main factor behind curve shape differences.

Comparing these two techniques to identify parchment coffee, the optical model generated with only 1 feature shows a better accuracy (99,72%) compared with the acoustic model generated with 257 features (98,88%), this difference is less than 1 % and could be considered little but is important for the industry. This result is more evident in the positive predictive values, where optical model identifies 99% of the parchment coffee, compared with the value of 98% obtained by the acoustic model.

Analyzing the number of features, the optical model is also simpler because it has only 1 feature compared with 257 features of the acoustic, however this simplicity is

not reflected in the predictive time because the optical model needed 27,43 ms compared to 11,77 ms obtained by the acoustic model. This result could be influenced by the methodology and not necessarily because the simplicity of the models, in fact the composition and the calculus involved in a Fine Gaussian SVM model (optical model) are simpler than a Bilayer Neural Network (acoustic model) composed of two hidden layers size 10 and applying a ReLU function; in this case the optical model had to use the values of 1 column in a matrix with 1000 cases x 2151 wavelengths (total 1000 values) and the acoustic model had to calculate using the values of a total matrix with 1000 cases x 257 frequencies (total 257 000 values). Even though the optical model has shown better performance, the model generated with AE is good enough to be considered in the industry as a complementary test, in this case the identification of key acoustic frequencies is important not only to simplify the model, it also could help to design and apply filters to the records.

5. Conclusions

The similarities between the patterns of the reflectance index and the acoustic power spectral density of the three sizes of green coffee is evidence that the small differences of CH were not an important factor, in contrast the presence of hull in parchment coffee was the key factor of differences.

Under the conditions that this research was conducted the optical model demonstrated to be a better technique identifying parchment coffee, this result is evident in the degree of clustering, measured with the Silhouette index obtained with the two techniques and the accuracy reached with bought techniques.

By leveraging both optical and acoustic properties, classification models were successfully developed. For optical data, a Fine Gaussian SVM model using a wavelength of 2175 nm achieved an accuracy of 99,75% in both validation and testing. In contrast, using all features of the acoustic power spectral density, a classification model based on a Bilayer Neural Network reached an accuracy of 98,88% in validation and 99,00% in testing.

Future research in nondestructive testing of coffee could focus on developing models to determine chemical composition using multispectral technology. In terms of acoustics, studies could explore this property to improve grain size separation, assess bean density, and detect damaged beans.

Funding: This research received no external funding

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Under request.

Acknowledgments: To Volcafe Costa Rica for supplying the samples.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. G. V Barbosa-Cánovas, R. W. Hartel, M. Peleg, and S. Rahman, "Quality Determinants In Coffee Production," 2021. [Online]. Available: http://www.springer.com/series/5996
2. A. Luna González, A. Macías Lopez, O. R. Taboada Gaytán, and V. Morales Ramos, "Cup quality attributes of Catimors as affected by size and shape of coffee bean (Coffea arabica L.)," *Int J Food Prop*, vol. 22, no. 1, pp. 758–767, Jan. 2019, doi: 10.1080/10942912.2019.1603997.
3. S. Y. Chen, C. Y. Chang, C. S. Ou, and C. T. Lien, "Detection of insect damage in green coffee beans using VIS-NIR hyperspectral imaging," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/RS12152348.
4. Q. Chen, H. Lin, and J. Zhao, *Advanced Nondestructive Detection Technologies in Food*. Springer Singapore, 2021. doi: 10.1007/978-981-16-3360-7.
5. Y. Liu *et al.*, "Non-Destructive Quality-Detection Techniques for Cereal Grains: A Systematic Review," Dec. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/agronomy12123187.
6. M. Aboonajmi, M. Jahangiri, and S. R. Hassan-Beygi, "A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products," *J Food Process Preserv*, vol. 39, no. 6, pp. 3175–3188, Dec. 2015, doi: 10.1111/jfpp.12444.
7. A. Harrenstein and G. Brusewitz, "Sound level measurements on flowing wheat," *Transactions of the ASAE*, vol. 29, no. 4, pp. 1114–1117, 1986.
8. T. C. Pearson, "Detection of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics" 2001.
9. I. Onaran *et al.*, "Detection of empty hazelnuts from fully developed nuts by impact acoustics; Detection of empty hazelnuts from fully developed nuts by impact acoustics," 2005.
10. T. C. Pearson, A. E. Cetin, and A. H. Tewfik, "Detection of insect damaged wheat kernels by impact acoustics," in *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005. doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416387.
11. T. C. Pearson, A. E. Cetin, A. H. Tewfik, and R. P. Haff, "Feasibility of impact-acoustic emissions for detection of damaged wheat kernels," *Digital Signal Processing: A Review Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 617–633, 2007, doi: 10.1016/j.dsp.2005.08.002.
12. J. Buerano, J. Zalameda, and R. S. Ruiz, "Microphone system optimization for free fall impact acoustic method in detection of rice kernel damage," *Comput Electron Agric*, vol. 85, pp. 140–148, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.compag.2012.04.014.
13. P. A. Eliopoulos, I. Potamitis, and D. C. Kontodimas, "Estimation of population density of stored grain pests via bioacoustic detection," *Crop Protection*, vol. 85, pp. 71–78, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.cropro.2016.04.001.
14. R. Mankin, D. Hagstrum, M. Guo, P. Eliopoulos, and A. Njoroge, "Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring, and management," *Insects*, vol. 12, no. 3, Mar. 2021, doi: 10.3390/insects12030259.
15. [15] F. Fleurat-Lessard, B. Tomasini, L. Kostine, and B. Fuzeau, "Acoustic detection and automatic identification of insect stages activity in grain bulks by noise spectra processing through classification algorithms."
16. G. Juodeikiene *et al.*, "Acoustic-Based Screening Method for the Detection of Total Aflatoxin in Corn and Biological Detoxification in Bioethanol Production," *Front Microbiol*, vol. 11, Apr. 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.00543.

17. V. Gasso-Tortajada, A. J. Ward, H. Mansur, T. Brøchner, C. G. Sørensen, and O. Green, "A novel acoustic sensor approach to classify seeds based on sound absorption spectra," *Sensors (Switzerland)*, vol. 10, no. 11, pp. 10027–10039, Nov. 2010, doi: 10.3390/s101110027.
18. P. S. Wilson, "Coffee roasting acoustics," *J Acoust Soc Am*, vol. 135, no. 6, pp. EL265–EL269, Jun. 2014, doi: 10.1121/1.4874355.
19. A. Magrini, M. Stallone, and G. Domenech Brambati SpA, "Control noise for coffee roasting," 2018.
20. International Organization for Standarization, "Green coffee-Determination of loss in mass at 105 °C Café vert-Détermination de la perte de masse à 105 °C Copyright International Organization for Standardization Provided by IHS under license with ISO Not for Resale No reproduction or networking permitted without license from IHS," 2003. [Online]. Available: www.iso.org
21. G. Navarra, M. Moschetti, V. Guarrasi, M. R. Mangione, V. Militello, and M. Leone, "Simultaneous determination of caffeine and chlorogenic acids in green coffee by UV/Vis spectroscopy," *J Chem*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/6435086.
22. A. Belay Gemta, A. Gholap, A. Belay, and A. V Gholap, "Characterization and determination of chlorogenic acid (CGA) in coffee beans by UV-Vis spectroscopy Characterization and determination of chlorogenic acids (CGA) in coffee beans by UV-Vis spectroscopy," *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 3, no. 11, pp. 234–240, 2009, doi: 10.5897/AJPAC.
23. P. Parras, M. Martínez-Tomé, A. M. Jiménez, and M. A. Murcia, "Antioxidant capacity of coffees of several origins brewed following three different procedures," *Food Chem*, vol. 102, no. 3, pp. 582–592, 2007, doi: 10.1016/j.foodchem.2006.05.037.
24. A. M. C. Davies" A N, "Review: Near infra-red analysis of food," 1987. [Online]. Available: https://academic.oup.com/ijfst/article/22/3/191/7867233.

Ações do projeto DigiFarm2all para incentivar a digitalização nas culturas permanentes em Portugal – o caso particular do olival

Francisco Mondragão-Rodrigues[1,2,3*], Cátia Pinto[4], André Duque[4], Lívia Plan[4], Raúl Estevinha[4], Luís Conceição[1,2,3]

1- Instituto Politécnico de Portalegre; *fmondragao@ipportalegre.pt*; *luis_conceicao@ipportalegre.pt*

2- VALORIZA – Centro de investigação para a valorização de recursos endógenos, Portalegre

3- MED – Instituto mediterrâneo para a agricultura, ambiente e desenvolvimento, Évora

4 – SFCOLAB – Laboratório Colaborativo para a inovação digital na agricultura, Dois Portos. *catia.pinto@sfcolab.org*; raul.estevinha@sfcolab.org ; *livia.pian@sfcolab.org*; *andre.duque@sfcolab.org*

*Correspondence: fmondragao@ipportalegre.pt

Resumo: O projeto DigiFarm2all - Sustentabilidade e Democratização da Agricultura 4.0, liderado pelo SFCOLAB, é financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência. Agrega um total de 20 parceiros institucionais e empresariais do setor agrícola e incide nas fileiras da vinha, olival, pequenos frutos, kiwi, abacate e laranja. No setor do olival, tem instalado um polo de demonstração na área de influência de Alqueva, com o apoio da Cooperativa Agrícola de Beja e Brinches, e outro em olival de montanha em parceria com a Cooperativa Agrícola dos Olivicultores do Fundão. Nestas regiões foram instalados dois pilotos tecnológicos constituídos por estações meteorológicas automáticas e sensores de solo, em configurações de baixo custo. Os dados recolhidos são apresentados numa plataforma dedicada, que pode ser acedida pelos técnicos e associados destas duas cooperativas. A informação apresentada destina-se ao apoio à tomada de decisão nas operações culturais da cultura do olival, nomeadamente na gestão da rega ou na realização de tratamentos fitossanitários. Nestes locais são realizadas periodicamente ações de capacitação, desmistificando o uso destes equipamentos sofisticados e mostrando a utilidade da informação recolhida para melhorar as práticas agrícolas, reduzindo custos e aumentando a produtividade. A possibilidade de ter, em tempo real, informação que pernita aos olivicultores a tomada de decisão para uma intervenção na cultura, quando necessário e no momento adequado, reduzindo a utilização desnecessária de fatores de produção, contribuirá para uma olivicultura mais sustentável.

Palavras-chave: Agricultura digital, Agricultura sustentável, Olivicultura, Sensorização.

1. O projeto DigiFarm2all

O projeto DigiFarm2all – Sustentabilidade e democratização da agricultura 4.0 – um projeto PRR liderado pela Associação SFCOLAB – Smart Farm Colab – Laboratório Colaborativo para a Inovação Digital na Agricultura, decorre entre outubro de 2022

e setembro de 2025 e tem como objetivo democratizar a Agricultura 4.0 (Ag 4.0), através de apoio técnico especializado na gestão integrada das culturas, otimizando o uso dos fatores de produção, protegendo os recursos naturais e minimizando o impacto ambiental, e contribuindo assim para a eficiência e intensificação sustentável da produção agrícola. A Agricultura 4.0, ao incorporar um conjunto de tecnologias e ferramentas como deteção proximal (sensores), deteção remota e comunicações (IoT), em associação com técnicas de inteligência artificial (IA) irá permitir avanços significativos na gestão da atividade agrícola e contribuir indubitavelmente para a sustentabilidade do setor nas suas componentes económica, ambiental e social. Para levar a cabo as ações programadas no projeto, o SFCOLAB reuniu 20 Parceiros, representando cooperativas e empresas do setor agrícola das fileiras da vinha, olival, pequenos frutos, kiwi, abacate e stakeholders da laranja, a que se somam uma confederação de agricultores, um polo de inovação, dois laboratórios colaborativos (CoLABs), um centro de competências e uma empresa tecnológica. As competências do consórcio permitem enfrentar o desafio da democratização da Agricultura 4.0, maior acesso a tecnologias digitais e utilização das mesmas em prol de uma agricultura sustentável.

O DigiFarm2all pretende democratizar a Ag4.0, pela disseminação dos seus benefícios, em particular aos produtores de pequena e média dimensão das 6 culturas abrangidas pelo projeto, através de: (a) instalação de pilotos tecnológicos – implementação de tecnologia acessível, de baixo custo, (sensoriamento IoT e remoto, com processamento de dados em tempo real suportado por aplicações de Machine Learning – ML); (b) suporte e aconselhamento técnico baseado na interpretação dos resultados, para modelação e previsão do uso dos fatores de produção e gestão das explorações; e (c) ações de capacitação para técnicos e produtores agrícolas de forma a promover a literacia digital.

Sendo a democratização e a literacia digital na e para a agricultura uma prioridade para a intensificação sustentável do setor, o projeto efetuou a instalação de uma rede significativa de demonstradores/pilotos com tecnologias digitais acessíveis, representativas de uma abordagem pragmática e de suporte a ações de capacitação (teórico-prática) dos técnicos agrícolas e agricultores. No projeto está contemplada a instalação de 17 pilotos (Figura 1) com tecnologia acessível, em articulação com cooperativas e explorações agrícolas integradas no consorcio do projeto, em 6 fileiras de importante peso económico nacional (vinha, olival, frutos vermelhos, kiwi, abacate e laranja), algumas especificadas na Resolução do Conselho de Ministros 97/2021 (olival, frutos vermelhos e abacates).

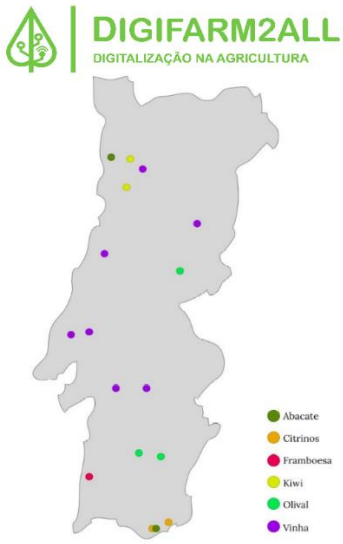


Figura 1. Localização dos 17 pilotos tecnológicos, para as culturas em estudo.

2. O olival no projeto DigiFarm2all

O projeto DigiFarm2all conta com 2 parceiros ligados ao olival, a Cooperativa Agrícola de Beja e Brinches (CABB), no Alentejo, e a Cooperativa Agrícola dos Olivicultores do Fundão (CAOF), na Beira Interior. A primeira foi selecionada por se encontrar na zona de influência do empreendimento de fins múltiplos de Alqueva, onde a cultura do olival tem sido objeto de uma importante expansão e intensificação. A segunda entidade situa-se no Município do Fundão, atualmente o município mais aberto à introdução de inovação e novas tecnologias e abordagens no setor primário do concelho do Fundão, onde o olival de montanha assume particular importância. Exemplo dessa vontade de massificar a utilização de tecnologias e soluções avançadas no setor agrário, foi a criação, pelo Município do Fundão, do Centro AGROTECH, onde as empresas podem testar e aplicar estas tecnologias num ambiente controlado, para demonstração aos agricultores da região.

Em colaboração com estas 2 entidades (CABB e CAOF), foram instalados 2 pilotos agrometeorológicos, um em cada região. O piloto agrometeorológico do Fundão foi o primeiro a ser instalado e encontra-se localizado no Centro AGROTECH. O piloto agrometeorológico da zona de influência da Cooperativa Agrícola de Beja e Brinches está instalado num olival em sebe, representativo da olivicultura moderna da região de Alqueva, está localizado no concelho de Beja. Estes pilotos são constituídos por um sensor de temperatura e humidade do ar, um sensor de radiação total e de radiação fotossinteticamente ativa, um sensor de direção do vento, um sensor de velocidade do vento e precipitação e por dois sensores de temperatura, humidade

e condutividade elétrica do solo, instalados a 20 e a 40 cm de profundidade (Figura 2). Além dos sensores, este sistema é ainda composto por um módulo de processamento e comunicação remota de dados e por um sistema autossuficiente de energia, composto por um painel solar e uma bateria. O SFCOLAB designa estas estações tecnológicas por SOFIS (Smart Orchard Ferti-irrigation System), que não são mais que um sistema de sensores personalizáveis, de custo acessível, desenvolvido pelo SFCOLAB e dimensionado de acordo com as necessidades específicas de cada exploração agrícola. Esta solução, no entender do SFCOLAB, é a melhor forma de introduzir esta tecnologia junto dos pequenos e médios agricultores das várias fileiras.

Figura 2. Piloto tecnológico instalado no olival em Beja.

3. As ações do DigiFarm2All no olival

Feita a instalação dos 2 Pilotos Tecnológicos, as ações do projeto na área da olivicultura passam por ações de capacitação e de demonstração do potencial destes equipamentos para melhorar/modificar as práticas agrícolas, facilitar a tomada de decisão, reduzir o uso de fatores de produção e, também, desmistificar junto do pequeno e médio agricultor o uso permanente (menos complicado do que parece) de equipamentos sofisticados. Para este último objetivo, o SFCOLAB pensou na construção de estações agrometeorológicas feitas à medida das necessidades de cada caso e, sobretudo, de baixo custo, ao contrário da maioria das soluções comerciais disponíveis no mercado, pouco flexíveis na sua arquitetura e ainda de custo elevado. O SOFIS é um sistema de aquisição de dados (sensores proximais de baixo custo, construídos "*on demand*" pelo SFCOLAB), um sistema de comunicação remota (adaptável às diferentes formas de transmissão de dados: GSM, WiFi ou LoRa, conforme a melhor opção disponível na exploração/região) com elevada frequência de transmissão de dados, processamento de dados e geração de informação útil em tempo real para a gestão dos recursos e fatores de produção.

Este é o primeiro passo para a adoção destas tecnologias digitais pelos agricultores: equipamentos acessíveis, de fácil funcionamento e com comunicações asseguradas em tempo real. O segundo passo para essa adoção de inovação é a promoção da literacia digital e dos proxys entre tecnologia e agronomia a todos os envolvidos no setor (agricultores, técnicos, consultores, cooperativas ou outro tipo de organizações do setor), oferecendo formação específica para desenvolver as competências necessárias e "derrubar mitos". Este segundo passo é concretizado através de numerosas ações de formação/capacitação delineadas especificamente, dentro do programa do projeto DigiFarm2All (Figura 3) ou englobadas em importantes eventos ligados à agricultura – certame OVIBEJA (Figura 4) ou Feira de Inovação Agrícola, no Fundão (Figura 5). Na realização destas ações assume um papel fulcral a participação da confederação de agricultores parceira do projeto – a CONFAGRI – e o Centro de Competências INOVTECHAGRO. Os técnicos destas 2 entidades, juntamente com a equipa técnica do SFCOLAB, transmitem, de forma simples e aplicada, as vantagens e a facilidade do uso das tecnologias em demonstração. A adoção da inovação e da digitalização só se efetua em pleno quando são ultrapassadas as barreiras de conhecimento (na facilidade de uso) e a insegurança no uso, o que é conseguido com o apoio dos técnicos das organizações da lavoura.

Figura 3. Ação de capacitação para técnicos e agricultores em Portalegre, em 2022.

A mobilização dos olivicultores é feita pelas cooperativas parceiras do projeto (CABB e CAOF), pois entendeu-se que são o veículo privilegiado para possibilitar a digitalização das explorações agrícolas, pela confiança que os associados depositam nestas, pela partilha de custos com equipamento e apoio técnico (do seu departamento técnico) que possibilitam, e por permitirem que dentro da organização se identifiquem os agricultores que poderão adotar mais facilmente as novas tecnologias num primeiro momento, permitindo que os restantes os sigam. Em resumo, considerando a sua arquitetura, este projeto está delineado para: (a)

facilitar a transição digital na agricultura; (b) introduzir a adoção de tecnologias digitais acessíveis; (c) permitir a capacitação de técnicos e agricultores/olivicultores; (d) contribuir para a intensificação sustentável na agricultura.

Figura 4. Ação de capacitação para técnicos e agricultores durante a OVIBEJA, em 2023.

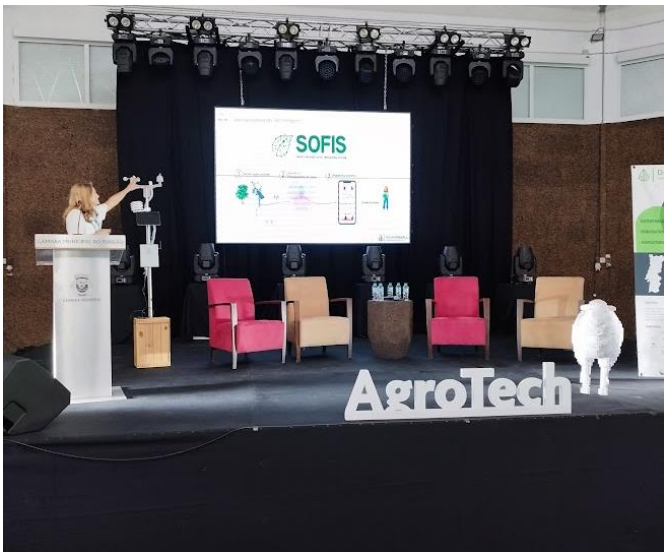


Figura 5. Ação de capacitação para técnicos e agricultores na Feira de Inovação do Fundão, em 2024.

4. O contributo do DigiFarm2All para os objetivos do Farm-to-Fork

A monitorização permanente das condições agrometeorológicas nos olivais, com recurso a sistemas SOFIS em demonstração no projeto DigiFarm2All, permite obter, em tempo real, numa plataforma dedicada, informação sobre temperatura do ar e do solo, humidade relativa do ar, humidade do solo, condições microclimáticas e a atividade da oliveira (fotossíntese e absorção/transpiração de água). No âmbito do projeto, estão a ser desenvolvidos modelos para as principais pragas e doenças da oliveira que, fazendo uso das variáveis meteorológicas e de solo, permitirão, mediante o uso de algoritmos com incorporação de IA e ML, dar indicações sobre o

nível de risco de ataque destas pragas e doenças. Esta informação, proporcionada em tempo real, possibilitará ao olivicultor ou ao técnico da cooperativa tomar a decisão de tratar (ou não tratar) a cultura com produtos químicos ou biológicos. A probabilidade de não efetuar um ou mais tratamentos fitossanitários, com base na informação fornecida pelo modelo inserido na plataforma, permite reduzir custos de produção, reduzir o impacto ambiental da cultura e, simultaneamente, contribuir para as metas de redução de produtos fitofarmacêuticos estabelecidas pela estratégia "Farm-to-Fork" (menos 50% de fitofármacos até 2030). A monitorização da atividade da planta através dos sensores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) poderá também delinear uma aplicação diferida de fertilizantes químicos, através da fertirrega, o que será outro contributo para outra meta da estratégia "Farm-to-Fork" relacionada com a adubação química (menos 20% de fertilizantes químicos até 2030).

5. O DigiFarm2All e a adaptação do olival às alterações climáticas

As alterações climáticas são uma realidade já experienciada pela maioria dos agricultores e culturas agrícolas em Portugal. Dentro da União Europeia, a Península Ibérica será uma das regiões mais afetadas pela mudança do clima, verificando-se nas próximas décadas um aumento generalizado das temperaturas (médias, máximas e mínimas) e uma diminuição da precipitação. Maior stress térmico, com maior transpiração por parte das oliveiras e menor disponibilidade de água para rega (por menor retenção e armazenamento em barragens e aquíferos) será o desafio com que o olival, e as restantes culturas agrícolas em Portugal, se enfrentarão a curto prazo. Deste modo, a gestão racional e eficiente dos escassos recursos hídricos disponíveis para o olival só poderá ser feita recorrendo a uma monitorização permanente das condições agrometeorológicas em que se encontram os olivais. É exatamente isto que permite o sistema SOFIS e é, por isso, de extrema importância iniciar já a capacitação dos técnicos e olivicultores no uso destes equipamentos e tecnologias, de modo que estejam preparados para enfrentar as condições adversas do futuro. Os vários parâmetros recolhidos pela estação agrometeorológica permitem disponibilizar informação crucial para decidir se se efetua uma rega e com que dotação, tendo em conta as condições ambientais, o momento do ciclo cultural e as disponibilidades de água ainda disponíveis até ao final da campanha.

6. Considerações finais

A possibilidade de ter informação, em tempo real, a partir de equipamentos digitais de baixo custo e de utilização simples, conectados a uma plataforma dedicada, que permita aos olivicultores a tomada de decisão para uma intervenção na cultura, quando necessário e no momento adequado, reduzindo a utilização desnecessária

de fatores de produção, com vantagens económicas e ambientais, contribuirá certamente para a democratização da agricultura 4.0 e uma olivicultura mais sustentável.

Financiamento: O projeto DigiFarm2All – sustentabilidade e democratização da agricultura 4.0 – (PRR-C05-i03-I-000108) é um projeto financiado pelo PRR – Programa de Recuperação e Resiliência, suportado com fundos da União Europeia (Next Genaration EU).

Diferencias en el reverdecimiento primaveral de especies de césped para áreas verdes en clima mediterráneo continental semiárido

Pedro V. Mauri[1], José F. Marín[2], David Mostaza-Colado[1], María Cruz Usano Martínez[3], and Lorena Parra [3*]

[1] Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) Finca El Encín, Autovía A-2. Km 38,200. 28805 Alcalá de Henares, Madrid. España; E-mail: david.mostaza@madrid.org, pedro.mauri@madrid.org

[2] ÁreaVerde MG Projects S.L., C/ Oña 43, Bajo, 28050 Madrid. España; jmarin@areaverde.es

[3] Departamento de Producción Agraria, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España; mariacruz.usano@upm.es

* Correspondence: lorena.parra@upm.es

Abstract: En los fríos inviernos que caracterizan el clima continental mediterráneo, las especies de césped entran en periodos de latencia, lo que repercute en la gestión de las áreas verdes. En las últimas décadas se han introducido nuevas especies de césped para conseguir áreas verdes sostenibles. En este trabajo, vamos a analizar las diferencias en el reverdecimiento primaveral de diferentes mezclas de césped caracterizadas por su tolerancia al estrés hídrico. Para ello, en octubre y noviembre de 2024, se prepararon una serie de parcelas, incluidas cuatro mezclas de césped compuestas por *Cynodon dactylon ssp*., *Zoysia matrella ssp*. y *Festuca arundinacea ssp*. Las parcelas de césped experimentales se establecieron utilizando tepes en lugar de semillas. Esta opción asegura un mejor éxito en el establecimiento y una mezcla homogénea de ambas especies. Las parcelas entran en latencia a principios de diciembre. A partir de principios de febrero, algunas de las mezclas probadas comenzaron el reverdecimiento primaveral. Se está utilizando fotografía digital para monitorear este reverdecimiento primaveral. Estas imágenes se toman una vez por semana desde principios de febrero hasta mediados de marzo. Las imágenes se analizan para calcular la porción verde de cada parcela como métrica para evaluar el reverdecimiento primaveral y comparar los diferentes procesos de las especies analizadas. De esta manera, será posible identificar qué especies analizadas tienen un período de latencia más corto y evaluar cómo esto impacta la percepción y gestión de las áreas verdes por parte de los usuarios.

Keywords: mezclas de cespitosas; microtermas; macrotermas; microclima;

1. Introducción

En la jardinería pública el uso de especies cespitosas para el establecimiento de zonas encespedadas tiene múltiples beneficios estéticos y funcionales. De entre los beneficios funcionales, el control de la erosión del suelo, mejora de la estructura del suelo, mejora de la contaminación atmosférica, fijación de carbono y la reducción

del efecto isla de calor urbano, los servicios ecosistémicos asociados, la fitorremediación de suelos o la reducción de la contaminación acústica son algunos de los más destacables [1-3] En cuanto a los beneficios estéticos estos tienen un gran impacto en la sociedad aumentando la salud física y mental de los ciudadanos y revalorizando el barrio entre otros [4]. Muchos de estos beneficios pueden ser alcanzados o incluso incrementados con el uso de praderas naturales [5], sin embargo, las actividades realizadas, concretamente las ligadas al uso recreativo y deportivo en las zonas de céspedes es a menudo incompatible con las praderas debido a los efectos del pisoteo en las plantas no cespitosas [6]. En los últimos años las praderas urbanas han sido usadas en mayores superficies sustituyendo a las áreas encespedadas, sin embargo, en zonas de alto valor paisajístico o en áreas como piscinas o zonas de juego, el uso de especies cespitosas no ha podido ser sustituido. Esta sustitución viene vinculada a los mayores beneficios, pero también a los requerimientos de mantenimiento de las zonas encespedadas [7]. Su alta demanda de riego, en especial en zonas de climas secos, es quizá el factor clave en esta cuestión.

Es por ello, que, en las últimas décadas, numerosos esfuerzos de han centrado en lograr establecer de forma eficaz áreas encespedadas con una menor huella hídrica. Para ello, se han buscado nuevas estrategias y sistemas de riego, como el riego enterrado que minimiza las pérdidas por escorrentía y evaporación, el uso de productos que retengan el agua en el suelo o la búsqueda de nuevas especies y variedades con una mayor eficiencia en el uso del agua [8]. En este último punto hay que destacar que la mayoría de las áreas de césped se constituyen empleando mezclas de cespitosas de tipo microtermas [9], las cuales se caracterizan por tener una menor eficiencia hídrica [10]. Esto se debe a un peor control estomático que hace que la planta tenga una menor tasa de captación de carbono frente a la perdida de agua por transpiración comparado con las especies macrotermas [11-12], que se caracterizan por una mayor eficiencia hídrica.

Microtermas y macrotermas tienen distintos ritmos de crecimiento asociados a la oscilación de temperaturas anuales, creciendo las microtermas en épocas de temperaturas moderadas frente al crecimiento de las macrotermas en momentos con temperaturas elevadas [13]. En contraposición de las microtermas que detienen su crecimiento en condiciones de frio, pero mantienen su pigmentación, las macrotermas entran en dormancia y pierden la pigmentación de las hojas [14], lo que es percibido de forma negativa por los usuarios de las zonas encespedadas. El momento exacto en que cada especie, e incluso cada variedad inicia el crecimiento es un dato interesante, aunque no bien estudiado. El uso de macrotermas para formación de áreas encespedadas se ha dado principalmente en regiones con climas cálidos e inviernos suaves, lo que reduce o elimina el periodo de dormancia invernal [15]. Sin embargo, el uso de estas especies en regiones caracterizadas por un el clima mediterráneo continental semiárido tiene grandes beneficios en la reducción de agua. Es por ello, que determinar el efecto de la temperatura en la salida de la dormancia, o reverdecimiento primaveral, es de vital importancia para evaluar su uso potencial en jardinería pública de distintas especies. Así mismo, el uso de mezclas que combinan microtermas y macrotermas mediante resiembras, puede ayudar a reducir dicho periodo.

En este estudio se ha diseñado un ensayo para evaluar el comportamiento de distintas combinaciones de especies cespitosas. Se han considerado cuatro combinaciones distintas para su evaluación, una mezcla únicamente con microtermas y que es usada comúnmente en jardinería que actuará como control, dos combinaciones con una única especie macroterma en cada una y una combinación que mezcla una especie microterma y una macroterma. Puesto que se estudiará posteriormente su respuesta a tres niveles de estrés hídrico y que cada mezcla se estudiará por triplicado, en el diseño general se han incluido un total de 36 subparcelas. Las parcelas se han establecido a partir de tepe y en un área del municipio de Madrid a final del otoño. En este artículo se estudia el reverdecimiento primaveral de las especies. Para ello se han tomado fotografías periódicas y se han registrado en continuo los datos de temperatura en distintos puntos de las parcelas.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diseño experimental

Se ha realizado un diseño experimental para analizar el comportamiento de distintas especies de cespitosas macrotermas y microtermas en el centro peninsular. La parcela en la que se va a realizar el estudio tiene unas dimensiones de 20 m de ancho y 33 m de largo, con una zona a utilizar en el ensayo de 16.5 m de ancho y 27 m de largo, debido a los desniveles y su forma irregularidades. Dado que se prevé el uso de tres niveles de riego se diseñan 3 sectores de riego, dentro de las cuales se ubican las subparcelas con las distintas especies. Cada subparcela tiene un tamaño de 2 m de ancho por 2 metros de largo, habiendo un total de 12 de estas subparcelas (3 repeticiones por 4 especies o mezclas a evaluar) en cada sector de riego con un pasillo de 1 m entre parcelas para evitar la contaminación de las parcelas. Además de las subparcelas ya mencionadas, se diseña la implantación de dos parcelas de mayor tamaño para futuros estudio que incluyan la aplicación de tratamientos diferenciados. Estas parcelas tienen unas dimensiones de 4 m de ancho por 4 m de largo sin ningún pasillo entre ellas de las especies macrotermas. Según el diseño se cuenta con 36 m2 de la mezcla de microtermas, 36 m2 de la mezcla de macroterma y microterma y 84 m2 de cada uno de los dos tepes compuestos por una única macroterma.

2.2. Especies empleadas

Tal como se ha indicado en la subsección anterior, se diseñó el ensayo para comparar 4 combinaciones de cespitosas. A modo de control se contó con una mezcla de *Festuca arundinacea* Schreb., *Poa pratensis* L. y *Lolium perenne* L. que es ampliamente usada en jardinería en la zona de estudio y que se caracteriza por una coloración relativamente uniforme a lo largo del año siempre que las necesidades hídricas estén cubiertas, lo que supone un elevado aporte de riego en verano. A esta mezcla se la nombrará patrón o control a lo largo del trabajo. En segundo lugar, se cuenta con dos especies de macrotermas que se emplean de forma independiente. Estas especies son *Cynodon dactylon* (L.) Pers. y *Zoysia matrella* (L.) Merr., las cuales se caracterizan por tener una dormancia invernal y ser más eficaces en el uso de agua, demandando un menor riego en verano. A estas dos mezclas se las nombrará como Xerocésped 2 (*C. dactylon*) y Xerocésped 1 (*Z. matrella*). Por último, y con el

objetivo de obtener un área encespedada con menor dormancia invernal se prueba una mezcla de *C. dactylon* con *L. perenne* y *F. arundinacea*. Esta mezcla se obtiene partiendo de un tepe de *C. dactylon* que ha sido resembrado con semillas de *L. perenne* y *F. arundinacea* se la considerará en el estudio como resiembra.

2.3. Suelo de la parcela

La parcela había estado manteniendo una zona encespedada y algunos árboles de pequeño porte en el pasado, Figura 1 a). El suelo tenía una textura demasiado pesada por lo que se realizó un aporte de arena, Figura 1 b). Este aporte de arena mejora la textura de suelo de cara al desarrollo del sistema radicular de las cespitosas. Tras el aporte de arena se realizaron labores para asegurar la homogenización de los primeros 40 cm de suelo con un arado tipo chisel para posteriormente un pase de rotavator. Una vez finalizadas las labores de homogenización se suelo se realizó un análisis de suelo cuyos resultados se muestran en la Tabla 1. Antes de instalar el sistema de riego, se pasó una grada de discos, Figura 1 c). El día previo a la instalación del tepe se realizaros sucesivos pases cruzados de grada de discos y se realizó un rulado hasta asegurar una uniformidad en la superficie del terreno que asegure el éxito en el establecimiento del tepe.

Tabla 1. Características del suelo.

Parámetro	Concentración en suelo
Na^+ (ppm)	85
K^+ (ppm)	80
Ca^+ (ppm)	40
NO^{3-} (ppm)	170
pH	7.54
Conductividad (µS/cm)	113
Sales (EC, mS/cm)	0.2

Figura 1. Labores de preparación del suelo, a) estado previo, b) aporte de arena, c) pase de grada de discos

2.4. Riego

En base al sistema de riego estructurado en tres sectores se instalaron las tuberías de riego formando un anillo en cada sector, las arquetas de riego fuera de la zona de riego y una estación para automatizar el riego que permite programar el riego. Las zanjas para la instalación del riego se realizaron con una zanjadora de cadena. Tras la instalación de los tepes, los aspersores fueron colocados en su lugar en

función de la ubicación de cada una de las subparcelas. El material empleado para la instalación de riego fue subministrado por *RainBird*. Una vez instalado el riego se realizó una analítica del agua, cuyos resultados se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del agua de riego.

Parámetro	Concentración en suelo
Na^+ (ppm)	250
K^+ (ppm)	110
Ca^+ (ppm)	77
NO^{3-} (ppm)	180
pH	7.95
Conductividad (µS/cm)	1385
Sales (EC, mS/cm)	0.7
Residuo seco (mg/L)	800

Se decidió que hasta el inicio del riego diferencial entre sectores de riego el riego se aplicaría de forma manual. Los riegos realizados en el periodo invernal se realizaron a razón de uno o dos riegos por mes en función de la climatología y fueron efectuados en los días 05/12/2024, 05/01/2025, 20/01/2025 y 21/02/2025. Aunque inicialmente a partir del riego del 21/02/2025 se iban a realizar más riegos con el fin de promover el inicio del crecimiento, hubo numerosos días de lluvia entre dicho riego y la fecha en que se dio por terminado el estudio, por lo que ni se realizaron riegos adicionales.

2.5. Instalación del tepe

El día 18/11/2024 se hizo el replanteo, Figura 2 a) y el día 19/11/2024 se recibió el tepe. Este se entregó en rollos de 40 cm por 2.5 m. El día 20/11/2024 por la mañana fue instalado en los campos. Para ello se rastrilló y despedregó de forma manual cada una de las subparcelas y se colocaron los tepes, Figura 2 b). Tras la colocación de todos los tepes se realizó un enarenado en superficie asegurando que se cubrieras las zonas de borde, Figura 2 c). Posteriormente se dio un riego de plantación.

a) *b)* *c)*

Figura 2. Instalación de los tepes a) replanteo, b) instalación, c) enarenado posterior

2.6. Medidas realizadas en las parcelas

Con el fin de evaluar el momento en que cada uno de los tepes inicia el reverdecimiento primaveral, se han tomado fotografías de las subparcelas cada dos semanas durante dos meses desde que las zonas encespedadas han iniciados los

cambios de coloración. Adicionalmente se tienen medidas de temperatura a ras de suelo en cada uno de los tres sectores de riego con sensores de Plantae [16]. Se pretende estudiar cuál de las especies es la primera en inicial la salida del periodo de dormancia, la rapidez y homogeneidad de esta salida y el posible efecto de variables microclimáticas. Para ellos los datos de verdor y uniformidad de cada tepe se obtendrán de forma matemática basándose en los histogramas de la banda verde de cada imagen. Todos los histogramas son normalizados antes de trabajar con ellos ya que las imágenes de las que se obtienen tienen un tamaño variable. Para normalizar el histograma se divide cada valor del histograma entre el valor total de pixeles. Partiendo de las imágenes que son consideradas como un césped de mayor calidad se determinará qué región del histograma corresponde a dicha coloración y la suma de pixeles con dicha intensidad será la estimación de verdor, como un valor entre el 0 y el 1, donde 1 indicará una calidad de verdor máxima, se calculará siguiendo la fórmula 1. Para evaluar la homogeneidad, se determinará qué región del histograma corresponde al césped previo al reverdecimiento y se calculará siguiendo la fórmula 2 y obtendrá valores de entre -1 y +1 siendo los valores cercanos al 1 una homogeneidad elevada.

$$Verdor = \frac{\sum(pixels\ I_{x1-y1})}{\sum(pixels\ I_{0-255})} \quad (1)$$

$$Uniformidad = \frac{\sum(pixels\ I_{x1-y1}) - \sum(pixels\ I_{x2-y2})}{\sum(pixels\ I_{x1-y1}) + \sum(pixels\ I_{x2-y2})} \quad (2)$$

donde x1 e y1 corresponde a los límites de intensidad para la región definida como pradera con coloración óptima de la mezcla control en el mejor momento de desarrollo, mientras que x2 e y2 corresponden a los límites de intensidad para la región definida como pradera de macrotermas antes del reverdecimiento primavera.

2.7. Obtención y procesado de datos

Los datos de temperatura son obtenidos de la sonda empleada en formato .cvs y son analizados para obtener la temperatura máxima diaria. En cuanto a las imágenes, los histogramas son obtenidos con el software Matlab 2022 b [17]. Los datos obtenidos son analizados con Statgraphics Centurion XVIII [18] para la obtención de correlaciones entre datos de temperatura de las parcelas, como suma de las temperaturas máximas alcanzadas, y los índices de verdor y uniformidad. También se realizaron Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar a partir de qué momento hay diferencias entre las especies empleadas.

3. Resultados

3.1. Temperatura

Los datos de temperatura para cada sector de riego indican que hay una clara variación microclimática en la zona de estudio con valores superiores de temperatura en la zona del sector 1, formado por las parcelas 1 a 12. Los valores de

temperaturas máximas acumuladas para cada sector desde el 01/01/2025 en cada uno de los días incluidos en este estudio se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Temperaturas máximas acumuladas.

	Temperatura superficial máxima diaria acumulada por periodos (°C)			
Sector/ Fecha	31/01/2025	14/02/2025	28/02/2025	14/03/2025
	31 días	45 días	59 días	73 días
Sector 1	553	873	1239	1449
Sector 2	506	805	1171	1376
Sector 3	488	780	1127	1316

Los cambios registrados suponen un incremento de temperatura medio de 1 °C del sector 1 respecto al sector 2 y de 1.8 °C del sector 1 respecto al sector 3. Estos cambios pueden ocasionar diferencias en la salida de la dormancia y el reverdecimiento primaveral de las parcelas y por tanto se tendrá en cuenta en el estudio. Estas diferencias son máximas en enero cuando la diferencia llega a ser de 1.5 °C entre el sector 1 y el sector 2 y de 2.1°C entre el sector 1 y el sector 3.

3.2. Reverdecimiento primaveral: fotografías iniciales y finales de cada sector

En la Figura 3 se muestran las imágenes obtenidas en el primer y en el último día del estudio, donde pueden verse claramente no solo las diferencias entre tratamientos sino también ligeras diferencias entre sectores de riego, lo que confirma la diferencia esperada a partir del análisis de temperaturas. En las imágenes de la Figura 3 a) y Figura 3 b) se puede ver el sector 1 al inicio y al final. Se observa claramente un aumento de la coloración verde en las subparcelas Control y un reverdecimiento de las subparcelas, las parcelas Xerocésped 1 y Xerocésped 2 no muestran una clara coloración verde, pese a que ambas especies ya han iniciado el reverdecimiento. Sin embargo, este reverdecimiento es incipiente y no lleva a reflejarse en las fotografías de una forma clara. En la Figura 3 c) y Figura 3 d) se observa el sector 2. De nuevo el cambio en las subparcelas del control son claras, pero las diferencias en las parcelas Resiembra no son tan evidentes como en el sector 1. Por último, en el sector 3, Figura 3 e) y Figura 4 f) solo se llegan a observar cambios en la coloración de las subparcelas Control.

a) *b)*

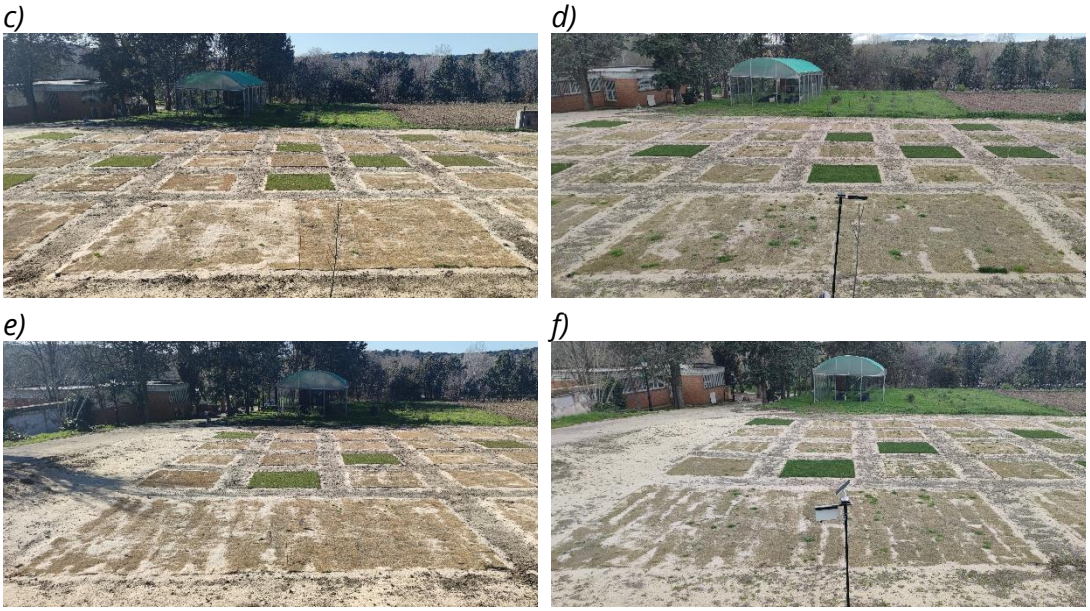


Figura 3. Imágenes al inicio y final de la toma de datos presentada en el artículo. Sector 1 inicio y final en subfiguras a) y b). Sector 2 inicio y final en subfiguras c) y d). Sector 3 inicio y final en subfiguras e) y f).

3.3. Reverdecimiento primaveral: análisis matemático

3.3.1. Identificación de los valores límite para definir las regiones de interés

El primer paso en el análisis matemático es la identificación de las regiones de interés, es decir el x1 e y1 y el x2 e y2 de las fórmulas 1 y 2. Esto se realiza con los histogramas de la que se determina como la mejor y la peor parcela. Las subparcelas seleccionadas han sido las subparcelas 5 en el día 31/01/2025 y la 27 en el día 14/03/2025. Los histogramas pueden verse en la Figura 4.

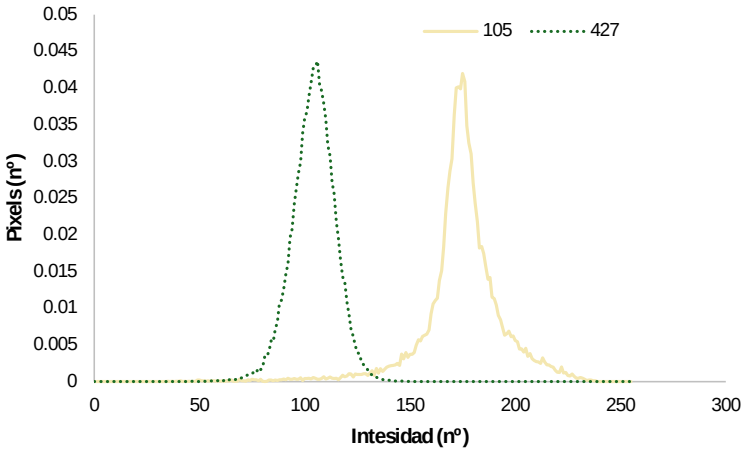


Figura 4. Histogramas para definir las regiones de interés.

En ambos histogramas podemos ver una distribución uniforme de los valores. Las regiones identificadas como regiones de interés vendrían definidas por el máximo de cada histograma, que es 106 para la región césped vigoroso o verde y 175 para la región de césped pardo. Para establecer la región se toman los valores de

intensidad de pixel que se encuentran en el percentil del 90 %. Los valores se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores para definir las regiones de interés.

Región	Valor más repetido	Valor máximo de intensidad (y)	Valor mínimo de intensidad (x)
Vigorosa o verde	106	92	117
No vigorosa o parda	175	167	192

3.3.2. Índices de verdor y uniformidad

Una vez establecidos los valores, se extrae de cada imagen los índices de verdor y de uniformidad según lo establecido en las fórmulas 1 y 2. Se trabaja con los datos medios de las tres repeticiones de cada sector, habiéndose eliminado los datos de las subparcelas en las que hubiera sombra. Los resultados del índice de verdor pueden verse en la Figura 5. En dicha figura podemos ver como en las subparcelas de Control, el aumento en el índice de verdor es constante a lo largo de los días sin embargo el aumento no es constante entre los distintos sectores de riego.

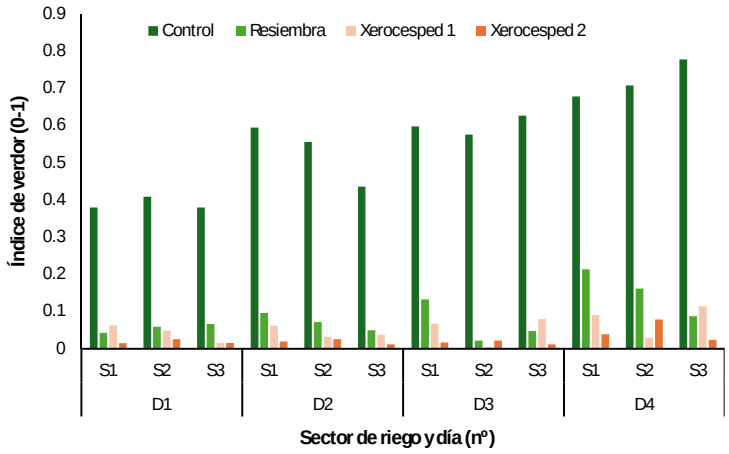


Figura 5. Índices de verdor de las subparcelas para cada tipo de césped a lo largo de los días y para cada sector.

Es decir, no hay un sector de riego en el que el aumento de verdor sea mayor que en los otros y no hay tendencias claras, por lo que inicialmente, el efecto microclimático detectado no parece tener un claro efecto. En cuanto a las subparcelas de Resiembra, vemos un aumento a lo largo de los días de una forma mucho más uniforme que en las de Control. También se observa claramente un aumento muy superior del vigor o verdor en las subparcelas del sector 1, para una mejor visión de los datos de las subparcelas de Resiembra, se muestran los datos de forma aislada en la Figura 6. En los grupos de subparcelas de Xerocésped 1 y Xerocésped 2 no se ven claras diferencias y los aumentos de verdor están más relacionados con la elevada proliferación de malas hierbas que con un reverdecimiento, pese a que tal como se ha indicado anteriormente este ha iniciado.

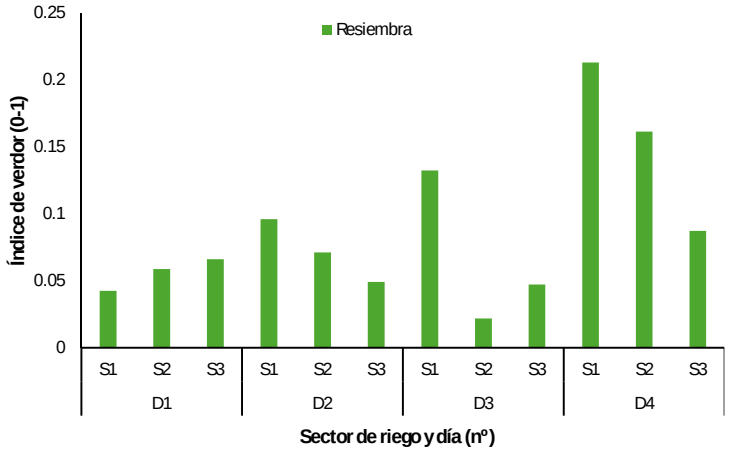


Figura 6. Índices de verdor de las subparcelas Resiembra a lo largo de los días y para cada sector.

Los datos de uniformidad indican claramente que la uniformidad, Figura 7, independientemente de la fecha, es muy superior en las subparcelas Control. No hay grandes diferencias en la uniformidad entre fechas ni entre sectores. Las subparcelas Resiembra no muestran un constante aumento de la uniformidad, sin embargo, en fecha 14/03/2025, en los sectores 1 y 2 la uniformidad de las parcelas ya es positiva, siendo algo superior en las subparcelas del sector 2. Que las subparcelas del sector 1 tenga un mayor verdor y una menor uniformidad en el fin de la toma de datos que las del sector 2 se debe a que en una de las subparcelas del sector 1 la germinación de las semillas de microterma ha sido muy irregular.

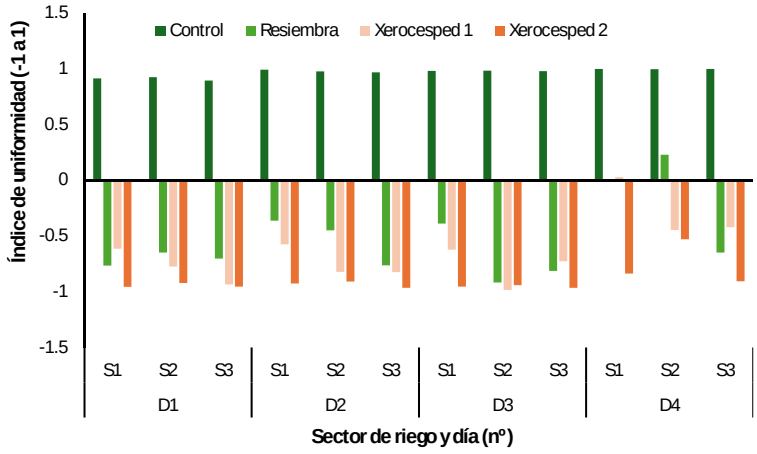


Figura 7. Índices de uniformidad de las subparcelas para cada mezcla a lo largo de los días y para cada sector.

4. Discusión

Para evaluar el efecto de las diferencias de temperatura se muestran correlaciones con los datos de temperaturas máximas acumuladas diarias frente a los índices de verdor y de uniformidad, Figura 8 y Figura 9. Los índices muestran una correlación mucho más significativa con la temperatura para las subparcelas de Control que

para las subparcelas de Resiembra. Los modelos para las subparcelas de las otras especies ensayadas no se muestran debido a la baja significancia de estos.

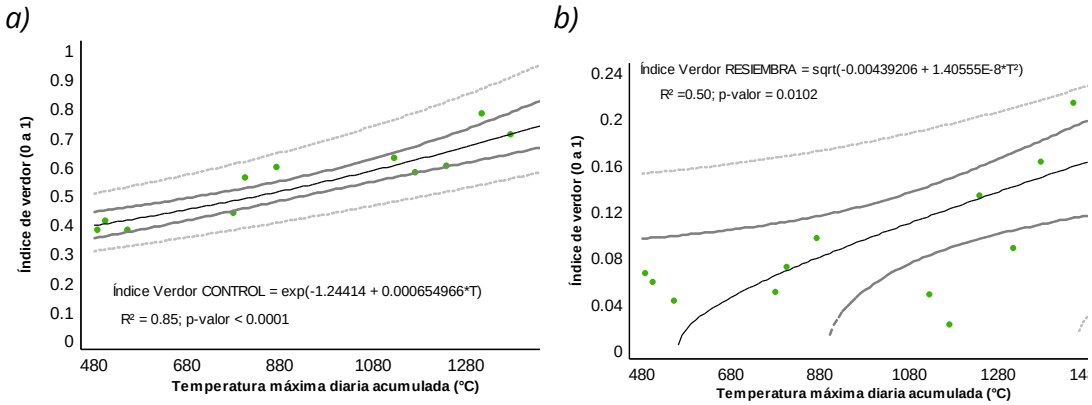


Figura 8. Correlaciones entre índice de verdor de Control a) y Resiembra b) con las temperaturas máximas diarias acumuladas.

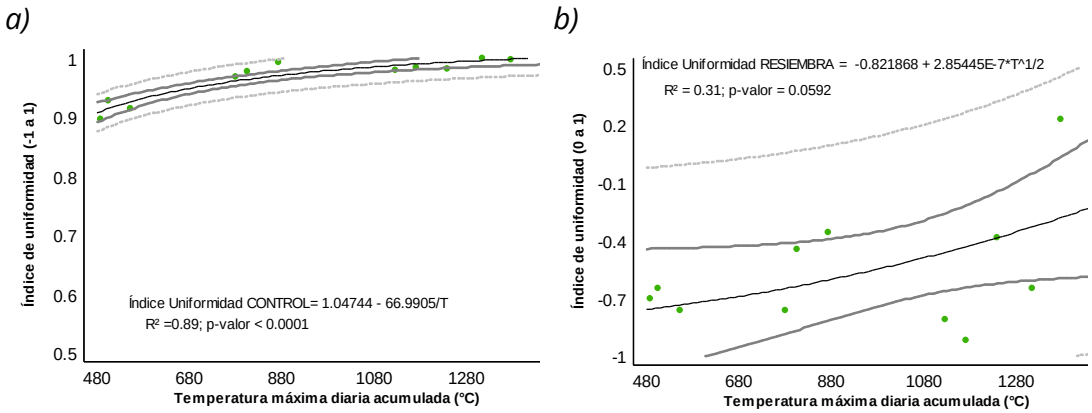


Figura 9. Correlaciones entre índice de uniformidad de Control a) y Resiembra b) con las temperaturas máximas diarias acumuladas.

Los resultados obtenidos, aunque provisionales, muestran una clara diferencia en las relaciones de cada una de las mezclas con la temperatura y cómo esta condiciona el reverdecimiento primaveral. Existe multitud de trabajos que han analizado los efectos del estrés hídrico en el reverdecimiento primaveral [19], los nutrientes en el suelo [20] o la aplicación de bioestimulantes [22]. Sin embargo, no existen estudios que describan y modelen la relación de la temperatura superficial con el reverdecimiento primaveral de especies cespitosas microtermas y macrotermas. Algunos trabajos, centrados en especies forrajeras, han abordado el impacto del aumento de temperatura debido al cambio climático, como los presentados en [22, 23]. Asimismo, existen algunos modelos que correlacionan temperaturas y reverdecimiento primaveral en grandes superficies [24, 25] basándose en técnicas de teledetección, aunque carecen de estudios sobre el efecto microclimático, tan relevante en jardinería. En cuanto a los valores de las métricas que caracterizan los modelos es ligeramente inferior que a los presentados en otros estudios (R^2 entre 0.17 y 0.53 [25]) pero se debe a la mayoría cantidad de zonas estudiadas. Otros modelos obtenidos para cespitosas, como los que correlacionan variables como temperatura superficial y verdor alcanzan valores de $R^2 = 0.78$ [26], sin embargo, en dicho estudio no se consideró el efecto microclimático de la

temperatura. El uso de la variación microclimática ha sido identificado como un factor importante para los balances de agua [27] y en la propagación de enfermedades [28]

5. Conclusiones

La dormancia invernal en las especies de macrotermas son un factor clave que está retrasando su implantación en jardinería pública, pese a sus numerosas ventajas. En este estudio se ha evaluado el reverdecimiento primaveral de varias subparcelas con distintas especies o mezclas de cespitosas incluyendo macrotermas y microtermas.

Los resultados indican que las subparcelas compuestas por macrotermas con una resiembra de microtermas han salido antes de la dormancia invernal sin embargo su uniformidad no es óptima en la fecha de finalización del estudio. Se han propuesto dos índices, de verdor y de uniformidad de la pradera cuyos resultados muestran su capacidad para diferenciar praderas. Además, se ha observado el efecto de un factor microclimático de temperatura en la salida del periodo de dormancia. Sin embargo, los datos actuales necesitan ser ampliados para cubrir el periodo de la salida de la dormancia de las subparcelas compuestas solamente por macrotermas.

En futuro trabajos emplearemos drones para la toma de datos tal como se indica en [26] para minimizar el efecto de las sombras. Así mismo se estudiarán los efectos de la aplicación de nitrógeno para estimular la salida de la dormancia en las especies C4 tal como se indica en [27].

Financiación: El proyecto FP24-GREENNATUR está financiado por la Comunidad de Madrid a través de IMIDRA

Agradecimientos: Queremos agradecer al personal de la UPM, a la empresa RainBird y al resto de los colaboradores que han trabajado en el establecimiento de las parcelas.

Referencias

1. Mathew, S. Role of Turfgrass in Urban Landscapes. J. Plant Dev. Sci. 2021, 13, 247–255.
2. Korohoda, N. P.; Kovtoniuk, O. V.; Halahan, O. O. Kyiv Green Areas: Assessment of the Functioning Efficiency and Volumes of Ecosystem Services for Erosion Control. J. Geol. Geogr. Geoecol. 2023, 32(3), 516–524.
3. Dradrach, A.; Karczewska, A.; Bogacz, A.; Kawałko, D.; Pruchniewicz, D. Accumulation of Potentially Toxic Metals in Ryegrass (Lolium perenne, L.) and Other Components of Lawn Vegetation in Variously Contaminated Sites of Urban Areas. Sustainability 2024, 16(18), 8040.
4. Braun, R. C.; Mandal, P.; Nwachukwu, E.; Stanton, A. The Role of Turfgrasses in Environmental Protection and Their Benefits to Humans: Thirty Years Later. Crop Sci. 2024, 64(6), 2909–2944.
5. Trémeau, J.; Olascoaga, B.; Backman, L.; Karvinen, E.; Vekuri, H.; Kulmala, L. Lawns and Meadows in Urban Green Space–A Comparison from Perspectives of Greenhouse Gases, Drought Resilience and Plant Functional Types. Biogeosciences 2024, 21(4), 949–972.
6. Ignatieva, M.; Haase, D.; Dushkova, D.; Haase, A. Lawns in Cities: From a Globalised Urban Green Space Phenomenon to Sustainable Nature-based Solutions. Land 2020, 9(3), 73.

7. Dorkina, N. Ecological Design of an Urban Meadow Informed by Contemporary Approaches to Lower-Intensity Management. J. Urban Ecol. 2023, (under review).
8. Şahin, M. Potential Use of Subsurface Drip Irrigation Systems in Landscape Irrigation under Full and Limited Irrigation Conditions. Sustainability 2023, 15(20), 15053.
9. Marín, J.; Yousfi, S.; Mauri, P. V.; Parra, L.; Lloret, J.; Masaguer, A. RGB Vegetation Indices, NDVI, and Biomass as Indicators to Evaluate C3 and C4 Turfgrass under Different Water Conditions. Sustainability 2020, 12(6), 2160.
10. Ebdon, J. S.; Petrovic, A. M.; Dawson, T. E. Relationship between Carbon Isotope Discrimination, Water Use Efficiency, and Evapotranspiration in Kentucky Bluegrass. Crop Sci. 1998, 38(1), 157–162.
11. Wagle, P.; Skaggs, T. H.; Gowda, P. H.; Northup, B. K.; Neel, J. P.; Anderson, R. G. Evaluation of Water Use Efficiency Algorithms for Flux Variance-Based Evapotranspiration Partitioning in C3 and C4 Grain Crops. Water Resour. Res. 2021, 57(5), e2020WR028866.
12. Culpepper, T.; Young, J.; Montague, D. T.; Sullivan, D.; Wherley, B. Physiological Responses in C3 and C4 Turfgrasses under Soil Water Deficit. HortScience 2019, 54(12), 2249–2256.
13. Law, Q. D.; Trappe, J. M.; Braun, R. C.; Patton, A. J. Greenhouse Gas Fluxes from Turfgrass Systems: Species, Growth Rate, Clipping Management, and Environmental Effects. Crop Sci. 2021, 50(3), 547–557.
14. Mitchell, R.; Redfearn, D. Observations of Spring Hard Freeze Injury to C4 Perennial Grasses Native to the Great Plains, USA. Am. J. Plant Sci. 2019, 10(5), 723–729.
15. Trammell, T. L.; Pataki, D. E.; Still, C. J.; Ehleringer, J. R.; Avolio, M. L.; Bettez, N.; Wheeler, M. M. Climate and Lawn Management Interact to Control C4 Plant Distribution in Residential Lawns across Seven US Cities. Ecol. Appl. 2019, 29(4), e01884.
16. Plantae. Sonda de Humedad y Temperatura. Available online: https://plantae.garden/sonda-de-humedad/ (accessed on 31 March 2025).
17. The MathWorks, Inc. MATLAB 2022b [Software]. Available online: https://www.mathworks.com (accessed on 31 March 2025).
18. Statgraphics Technologies, Inc. Statgraphics Centurion XVIII [Software]. Available online: https://www.statgraphics.com (accessed on 31 March 2025).
19. Yu, S.; Fontanier, C.H.; Martin, D.L.; Moss, J.Q.; Goad, C.L.; Wu, Y. Effect of antecedent drought stress on spring green-up in turf-type bermudagrasses. Agrosyst. Geosci. Environ. 2023, 6(2), e20353.
20. Wen, H.; Li, X.; Zhang, Y.; Jin, S.; Sun, W.; Wang, H.; Wang, L. Changes in Soil Elements and Nutritive Value of Cool-season Turfgrass during Green-up. HortScience 2025, 60(4), 504–511.
21. De Luca, V.; Gómez de Barreda, D. Effect of a Biostimulant on Bermudagrass Fall Color Retention and Spring Green-up. Agronomy 2021, 11(3), 608.
22. Piao, S.; Liu, Q.; Chen, A.; Janssens, I. A.; Fu, Y.; Dai, J.; Zhu, X. Plant Phenology and Global Climate Change: Current Progresses and Challenges. Global Change Biology 2019, 25(6), 1922–1940.
23. Yang, Z.; Jiang, N.; Huang, Y.; Shen, M.; Zhu, W.; Fu, Y.; ... & Janssens, I. Growing-season climate as an explanation of spatial variations in temperature sensitivity of green-up on Tibetan Plateau. Ecosphere 2024, 15(2), e4761.
24. Jiang, N.; Shen, M.; & Yang, Z. Differential phenological responses to temperature among various stages of spring vegetation green-up. J. Plant Ecol. 2024, 17(6), rtae063.
25. Post, A. K.; Hufkens, K.; & Richardson, A. D. Predicting spring green-up across diverse North American grasslands. Agric. For. Meteorol. 2022, 327, 109204.

26. Yousfi, S.; Marín, J.; Parra, L.; Lloret, J.; & Mauri, P. V. Remote sensing devices as key methods in the advanced turfgrass phenotyping under different water regimes. Agric. Water Manag. 2022, 266, 107581.
27. Chhetri, M.; Fontanier, C.; Moss, J. Q.; & Wu, Y. Effects of combined shade and drought stress on turf-type bermudagrasses. Int. Turfgrass Soc. Res. J. 2022, 14(1), 194–204.
28. Peacock, C. H.; & Lyford, P. R. Use of fans and their effects on the turf microenvironment and disease development. Int. Turfgrass Soc. Res. J. 2022, 14(1), 1088–1091.
29. Parra, L.; Ahmad, A.; Zaragoza-Esquerdo, M.; Ivars-Palomares, A.; Sendra, S.; & Lloret, J. A Comprehensive Survey of Drones for Turfgrass Monitoring. Drones 2024, 8(10), 563.
30. Sermons, S. M.; Wherley, B. G.; Zhang, C.; Bowman, D. C.; & Rufty, T. W. The role of internal and external nitrogen pools in bermudagrass growth during spring emergence from dormancy. J. Plant Nutr. 2017, 40(10), 1404–1416.

Modelización del secuestro de carbono en plantaciones de higuera mediante teledetección.

Antonio Jesús Galán [1]*, Margarita López-Corrales [1] y José Marques da Silva [2, 3]

[1] Junta de Extremadura, Centro de Investigación Finca La Orden-Valdesequera (CICYTEX), Fruticultura, Autovía Madrid-Lisboa, s/n, 06187, Guadajira, Spain.

[2] MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development and CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Institute for Advanced Studies and Research, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal.

[3] Agroinsider Lda. (Spin-off of Universidade de Évora), Parque Industrial e Tecnológico de Évora, R. Circular Norte, NERE, Sala 18, 7005-841 Évora, Portugal

* Correspondence: antoniojesus.galan@juntaex.es.

Abstract: El cambio climático constituye uno de los mayores desafíos actuales, siendo prioritaria la reducción de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2). En este contexto, los sistemas agrícolas actúan como sumideros de carbono mediante la captura de CO_2 atmosférico por fotosíntesis y su almacenamiento en la biomasa. La teledetección se presenta como una herramienta precisa, eficiente y no invasiva para estimar biomasa y monitorizar grandes superficies. Extremadura, al suroeste de España, concentra más del 50% de la superficie nacional cultivada con higuera (Ficus carica L.), un frutal con alto potencial de secuestro de carbono. Este estudio evaluó tres sistemas de manejo (tradicional en secano, intensivo y superintensivo en regadío), correlacionando parámetros estructurales de los árboles, como el diámetro del tronco, con los índices espectrales NDVI y NDWI obtenidos mediante imágenes Sentinel-2 (2019–2024). Los resultados muestran una correlación positiva entre ambos índices y la cantidad de CO_2 acumulado por metro de tronco, destacando NDWI como mejor predictor del crecimiento diametral (R^2 = 0,87). Este trabajo contribuye al desarrollo de modelos innovadores para cuantificar el carbono fijado por frutales, apoyando estrategias de mitigación climática y el potencial diseño de esquemas de créditos de carbono.

Keywords: Cambio climático, Dióxido de Carbono, Teledectección, *Ficus carica* L.

1. Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos de la sociedad actual y es causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)[1]. Entre estos, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son los tres más importantes, contribuyendo en conjunto al 90% del calentamiento global antropogénico [2]. Estas emisiones han generado cambios en los principales indicadores climáticos, como la temperatura, las precipitaciones, la elevación del nivel del mar, la acidificación de los océanos y la intensificación de eventos climáticos extremos. Entre los desastres asociados a estas variaciones se incluyen

sequías, inundaciones, huracanes, tormentas severas, olas de calor, incendios forestales, olas de frío y deslizamientos de tierra [3].

A nivel global, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) continúan en aumento. No obstante, existen diversas estrategias para mitigar su impacto, entre las cuales destacan, por su origen natural, el cultivo y la conservación de árboles frutales y forestales [4]. En concreto, el CO_2 es absorbido de la atmósfera y almacenado como carbono en la biomasa en forma de tronco, ramas, hojas, raíces e incorporándolo al suelo. [5]. En el secuestro de Carbono en árboles frutales intervienen diversos factores como edad de la plantación, especie, necesidades nutritivas, disponibilidad de agua, latitud, temperatura y los gases atmosféricos influyen en gran medida en la tasa de secuestro de carbono[4] .

La estimación *in situ* del secuestro de CO_2 por los cultivos, es una tarea difícil y costosa que requiere una exploración espacial de forma exhaustiva [6]. Actualmente, la tecnología de teledetección se está utilizando para realizar estos cálculos. Los datos satelitales proporcionan valores de reflectividad en diferentes longitudes de onda, lo que permite monitorizar la captura de carbono en grandes superficies de forma precisa, rápida y económica [7].

La higuera (*Ficus carica* L.) es un cultivo en expansión en la región de Extremadura (España). Desde 2010, su superficie se ha duplicado, alcanzando 12821 ha en el año 2024, lo que representa el 55,7% de la superficie total cultivada en el país (ESYRCE, 2025). En esta zona, la higuera está establecida tanto en sistemas más tradicionales, con amplios marcos de plantación en secano, como en sistemas superintensivos, de marcos más reducidos y con riego [8].

Por ello, los objetivos de este estudio fueron determinar la relación entre distintos parámetros agronómicos y los índices satelitales NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), como primer paso para desarrollar un modelo que permita estimar la captura y el secuestro de carbono en el cultivo de la higuera.

2. Materiales y métodos.

Este estudio se realizó en 2024 en tres higuerales ubicados en las principales zonas productoras de higo de la comunidad autónoma de Extremadura. Cada uno de ellos representa un tipo de plantación, desde el sistema más tradicional hasta el más intensivo. Las características de las parcelas son las siguientes:

Tipo de plantación	Características
Tradicional	0'39.30"N, 6° 3'41.15"O)	**Variedad:** Calabacita **Superficie**: 10,63 ha **Marco plantación**: 7 x 7 m (204 árboles/ha) **Régimen hídrico:** Secano **Edad de plantación:** 13 años **Localización:** La Nava de Santiago (Badajoz). (39°
Intensivo		**Variedad:** Calabacita **Superficie**: 18,10 ha **Marco plantación**: 5 x 5 m (400 árboles/ha) **Régimen hídrico:** Regadío **Edad de plantación:** 7 años **Localización:** Guareña (Badajoz). (39° 0'35.55"N, 6° 3'39.16"O)
Superintensivo	del Guadiana (Badajoz). (39° 6'41.38"N, 6° 2'35.37"O)	**Variedad:** Calabacita **Superficie**: 13,34 ha **Marco plantación**: 4 x 2 m (1200 árboles/ha) **Régimen hídrico:** Regadío **Edad de plantación:** 5 años **Localización:** Conquista

Se realizó un seguimiento durante los años 2019 a 2024 del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) mediante la aplicación smartAG (versión 4.5.8) de la empresa Agroinsider. Esta plataforma emplea datos de observación de la Tierra del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, utilizando imágenes satelitales de los sensores Sentinel-1 y Sentinel-2. Los datos son descargados y procesados automáticamente

mediante algoritmos de inteligencia artificial que proporcionan macrodatos y el uso de técnicas de aprendizaje aplicadas al monitoreo agrícola [9].

Teniendo en cuenta los datos obtenidos entre los años 2019 y 2023, se seleccionaron tres puntos por parcela correspondiente a los máximos, mínimos y medios del NDVI, con el fin de representar de forma eficiente la variabilidad espacial de cada sistema de cultivo.

Una vez determinados los puntos de muestreo, se calculó el promedio anual de los valores de NDVI y NDWI correspondiente a cada punto, considerando el periodo comprendido entre septiembre de 2023 y finales de agosto de 2024, para obtener el promedio de un año.

A continuación, se seleccionaron nueve árboles por punto, sobre los cuales se midió el perímetro del tronco a 20 cm del suelo, utilizando cinta métrica. A partir de estas mediciones, se calculó el diámetro del tronco ($D = P/\pi$), y se estimó el crecimiento anual del diámetro dividiendo el valor total entre la edad del cultivo en cada sistema.

Posteriormente, se calculó la superficie transversal del tronco usando la fórmula del área del círculo $A=\pi\cdot(D/2)^2$, y se estimó el volumen de un metro de tronco como $V=A\cdot100$ (en cm^3). La biomasa leñosa seca fue calculada multiplicando el volumen por la densidad de la madera, utilizando un valor de 0,54 g/cm^3, reportado por Odabaş-Serin y Kılıç (2020)[10] para madera de higuera. Para la estimación del contenido de carbono, se aplicó un coeficiente promedio de 0,46 [11], correspondiente al porcentaje de carbono en la materia seca de especies frutales. Finalmente, la cantidad de CO_2 equivalente almacenado se calculó multiplicando el carbono estimado por 3,67, siguiendo el factor de conversión estándar (IPCC, 2006).

3. Resultados

Para la selección de los puntos de muestreo en las parcelas, se utilizó el mapa rasterizado del promedio del NDVI correspondiente a los últimos cinco años (2019–2023), mostrado en la Figura 1. Con base en esta información, se identificaron los siguientes puntos:

- **Puntos con valores máximos de NDVI**, representados en las zonas por el color verde intenso: T1, I1 y S1.
- **Puntos con valores medios de NDVI**, representados en las zonas por el color amarillo: T2, I2 y S2.
- **Puntos con valores mínimos de NDVI**, representados en las zonas por el color azul: T3, I3 y S3.

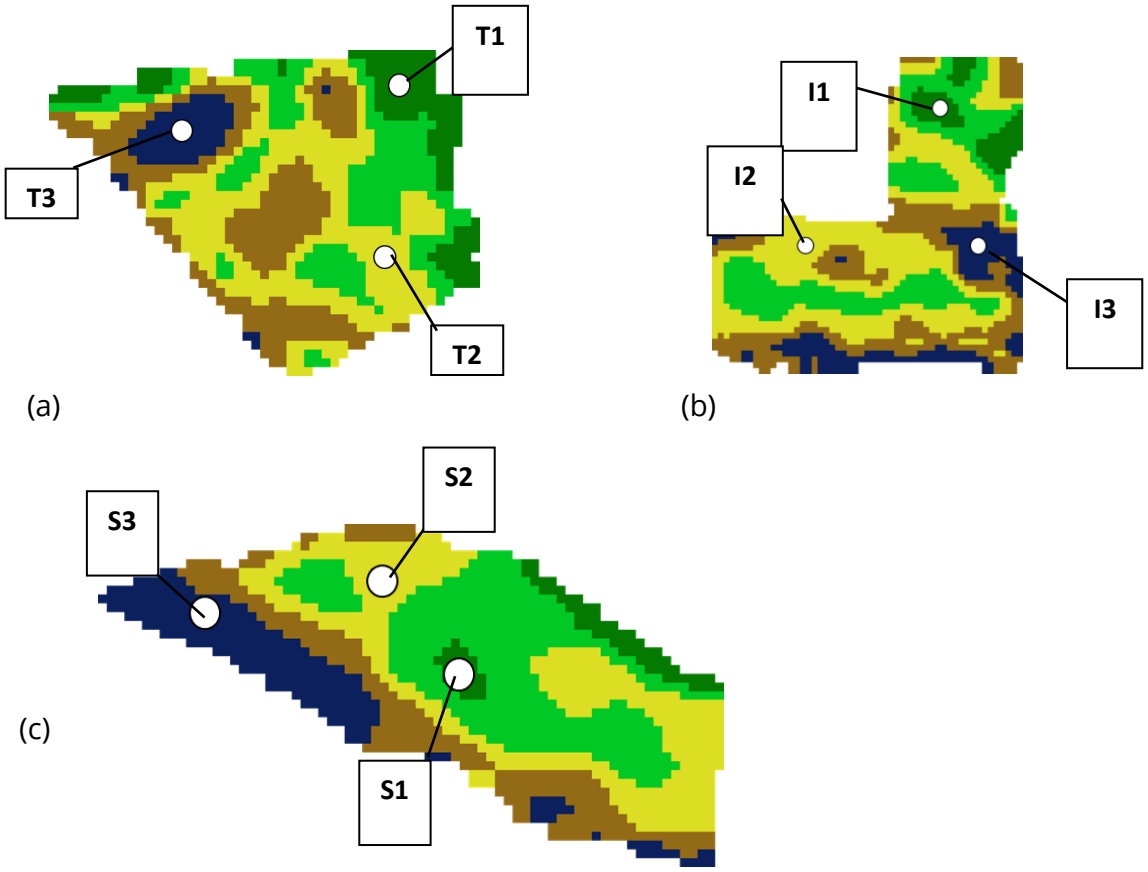
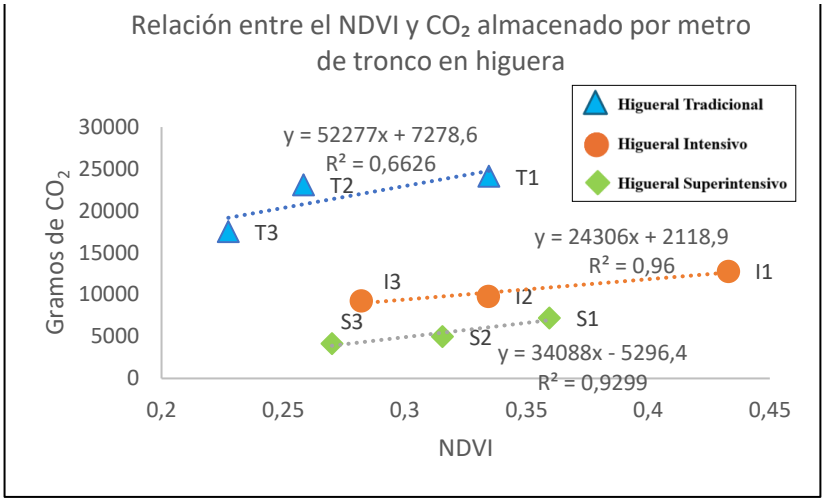
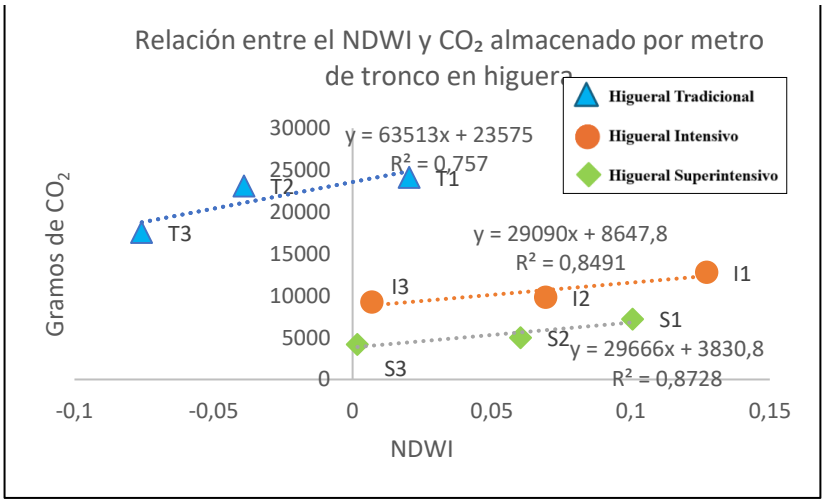


Figura 1. Mapa rasterizado del promedio de NDVI (2019-2023) de las parcelas en estudio y los puntos muestreados obtenido por SmartAG. (a) Higueral tradicional, (b) Higueral intensivo y (c) Higueral superintensivo.

La figura 2 presenta la relación entre NDVI/ NDWI y la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) almacenado por metro de tronco en higuera bajo los tres sistemas de cultivo estudiados: tradicional en secano (azul), intensivo en regadío (naranja) y superintensivo en regadío (verde).



(a)



(b)

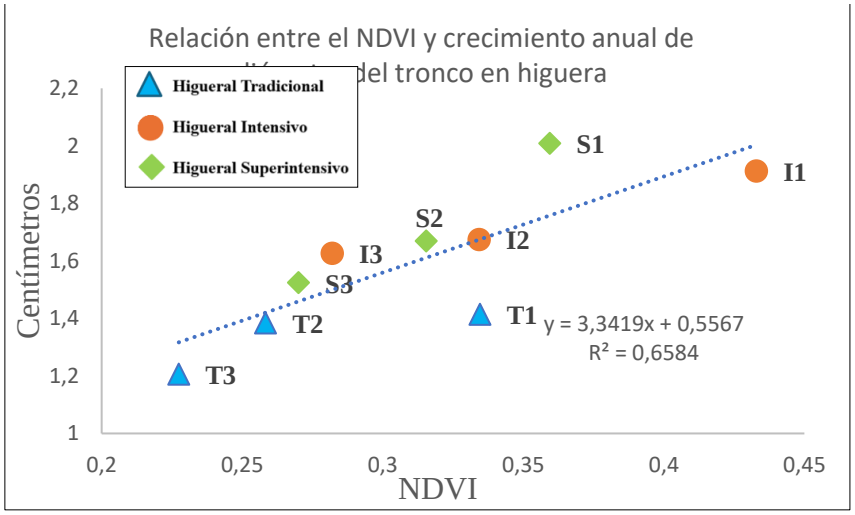
Figura 2. Relación entre la cantidad de CO_2 almacenado por metro de tronco en tres sistemas de cultivo de higuera y (a) NDVI, (b) NDWI.

En términos generales, tanto el NDVI como el NDWI mostraron un comportamiento similar en los tres sistemas de plantación, observándose en ambos casos una correlación positiva entre los valores de los índices y la cantidad de CO_2 acumulado por metro de tronco.

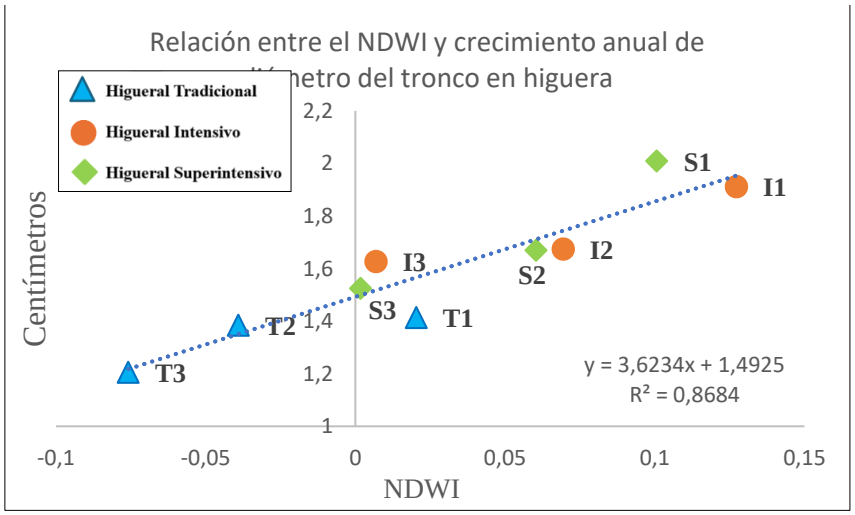
Respecto a la cantidad de CO_2 almacenado, los sistemas se ordenaron de mayor a menor en el siguiente orden: tradicional, intensivo y superintensivo, lo cual se relaciona con la edad de las plantaciones, de 14, 7 y 5 años respectivamente. Esta asociación fue particularmente fuerte en los sistemas intensivo y superintensivo, donde se observaron coeficientes de determinación (R2) superiores a 0.84, lo que sugiere una relación consistente entre la actividad fisiológica detectada por los índices espectrales y la capacidad de secuestro de carbono.

En cuanto a las pendientes de las regresiones, se observaron diferencias relevantes entre los sistemas de cultivo y los índices utilizados. Las pendientes más altas se registraron en el sistema tradicional, tanto para NDVI como para NDWI, lo que indica una mayor cantidad de CO_2 almacenado por unidad de incremento en el índice. Esto sugiere que, en sistemas más desarrollados y con mayor edad, pequeños aumentos en la respuesta espectral se traducen en una mayor acumulación de biomasa leñosa. En contraste, los sistemas intensivo y superintensivo, con árboles más jóvenes y menor desarrollo estructural, presentaron pendientes menores, reflejando una menor eficiencia en términos de acumulación de carbono por unidad de índice.

La Figura 3 muestra la relación entre los índices espectrales NDVI y NDWI con el crecimiento anual del diámetro del tronco en las diferentes parcelas estudiadas y su relación entre sí. En ambos casos, se observa una tendencia positiva, es decir, a medida que aumentan los valores de NDVI o NDWI, también lo hace el incremento del diámetro del tronco.



(a)



(b)

Figura 3. Relación entre el crecimiento anual del diámetro del tronco en tres sistemas de cultivo de higuera y (a) NDVI, (b) NDWI.

Se observa que los sistemas intensivo y superintensivo presentan crecimientos anuales del diámetro del tronco mayores y más similares entre sí, en comparación con el sistema tradicional, que muestra los valores más bajos. Esta diferencia puede atribuirse al manejo del riego, ya que tanto el sistema intensivo como el superintensivo cuentan con riego, mientras que el sistema tradicional es de secano. El aporte hídrico constante podría favorecer un desarrollo vegetativo más vigoroso y sostenido, traduciéndose en un mayor incremento anual del diámetro del tronco.

En el caso de NDVI presenta una pendiente del 3,34 y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.66$, lo que indica una relación moderadamente fuerte. Sin embargo, algunos puntos (como S1 y T1) se desvían de la tendencia, lo que podría estar relacionado con características fisiológicas particulares o prácticas agronómicas. El índice NDWI presenta una pendiente ligeramente mayor (3,62) y un ajuste mucho más fuerte con $R^2 = 0,87$. Esto nos sugiere que el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), podría ser un mejor predictor de crecimiento en diámetro que el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

4. Conclusiones

El presente estudio demostró que los índices espectrales obtenidos por teledetección, en particular el NDVI y el NDWI, presentan una relación positiva con el crecimiento anual del tronco y con la cantidad de CO_2 almacenado en diferentes sistemas de cultivo de higuera. Entre ambos índices, el NDWI mostró un mayor grado de correlación, lo que indica que el contenido hídrico de la vegetación puede ser un predictor más sensible del desarrollo leñoso en comparación con la actividad fotosintética.

Los sistemas de cultivo con riego (intensivo y superintensivo) presentaron mayores incrementos anuales en el diámetro del tronco, probablemente como resultado de una mejor disponibilidad hídrica, mientras que el sistema tradicional (de secano) mostró un mayor almacenamiento total de CO_2, atribuido a su mayor edad y desarrollo estructural acumulado.

Además, la integración de datos satelitales multianuales (2019–2023) y el análisis específico de puntos con valores extremos y medios de NDVI, permitió capturar de manera efectiva la variabilidad intra-parcelaria, evidenciando el potencial del monitoreo mediante plataformas como SmartAG para la gestión de cultivos leñosos y la estimación del secuestro de carbono.

En conjunto, los resultados respaldan la utilidad de los índices espectrales como herramientas no invasivas para la evaluación del crecimiento y la captura de carbono en sistemas agrícolas, y ofrecen una base metodológica para el desarrollo de modelos predictivos aplicables a diferentes condiciones de manejo en cultivos de higuera.

Financiación: Esta investigación se encuentra dentro del proyecto 0100_TID4AGRO_4_E. El proyecto 0100_TID4AGRO_4_E está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa INTERREG VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027 de la Comisión Europea.

5. Bibliografía

1. Oreggioni, G.D.; Monforti Ferraio, F.; Crippa, M.; Muntean, M.; Schaaf, E.; Guizzardi, D.; Solazzo, E.; Duerr, M.; Perry, M.; Vignati, E. Climate Change in a Changing World: Socio-Economic and Technological Transitions, Regulatory Frameworks and Trends on Global Greenhouse Gas Emissions from EDGAR v.5.0. *Global Environmental Change* **2021**, *70*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2021.102350.
2. Li, K.; Du, L.; Qin, C.; Bolan, N.; Wang, H.; Wang, H. Microplastic Pollution as an Environmental Risk Exacerbating the Greenhouse Effect and Climate Change: A Review. *Carbon Research* 2024, *3*.
3. Climate Action and Support Trends; 2019;
4. Sharma, S.; Rana, V.S.; Prasad, H.; Lakra, J.; Sharma, U. Appraisal of Carbon Capture, Storage, and Utilization Through Fruit Crops. *Front Environ Sci* 2021, *9*.
5. Hurd, C.L.; Law, C.S.; Bach, L.T.; Britton, D.; Hovenden, M.; Paine, E.R.; Raven, J.A.; Tamsitt, V.; Boyd, P.W. Forensic Carbon Accounting: Assessing the Role of Seaweeds for Carbon Sequestration. *J Phycol* 2022, *58*, 347–363.
6. Uttaruk, Y.; Laosuwan, T. Carbon Sequestration Assessment of the Orchards Using Satellite Data. *Journal of Ecological Engineering* **2017**, *18*, 11–17, doi:10.12911/22998993/66257.
7. Laosuwan, T.J.; Uttaruk, P.; Klinhom, ^; Butthep, ^; Samek, ^; ' ' And Skole, J.H. The Development of Web-Based GIS Application for Agroforestry Carbon Sequestration Offset Project in Thailand;
8. Galán, A.J.; Martín, A.; Torres-Vila, L.M.; Ruiz-Moyano, S.; Galván, A.I.; Serradilla, M.J.; López-Corrales, M. Quantification and Identification of Damage Caused by Pests and Fungi in Dried Figs from Orchards with Different Levels of Agronomic Management in the Main Production Areas of Extremadura (SW Spain). *Crop Protection* **2023**, *172*, 106334, doi:10.1016/j.cropro.2023.106334.
9. Lourenco, P.; Da Silva, J.R.M.; Paixao, L. SmartAG - A Smart Farming Tool. In Proceedings of the 6th Experiment at International Conference, exp.at 2023 - Proceedings; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023; pp. 51–52.
10. Makalesi, A.; Odabaş Serin, Z.; Penezoğlu, K. İncir (Ficus Carica) Odunun Kimyasal, Fiziksel ve Morfolojik Özellikleri. *European Journal of Science and Technology* **2020**, 843–849, doi:10.31590/ejosat.784500.
11. Mota, C.; Alcaraz-López, C.; Iglesias, M.; Martínez-Ballesta, M.C.; Carvajal, Micaela. *Investigación Sobre La Absorción de Co2 Por Los Cultivos Más Representativos.*; Murcia, España, 2010;

Using Digital Platforms for Knowledge Transfer: Insights from the NEGHTRA Project

José Rico[1*], Diogo Coelho[1], Vasco Cruz[2] and Fátima Baptista[2]

MED – Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Institute for Advanced Studies and Research, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal. diogojrc@uevora.pt (DC)

MED – Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal. fb@uevora.pt (FB); vfc@uevora.pt

* Correspondence: jcsr@uevora.pt (JR)

Abstract: Digitalisation has emerged as an essential tool in transforming education and disseminating knowledge across various fields. The use of digital platforms opens new possibilities for knowledge transfer, offering flexible, interactive, and efficient access to different types of content. This paper explores how digitalisation has been applied in the NEGHTRA project, with a focus on knowledge transfer related to greenhouse technologies. The project employs an accessible e-learning platform, based on video lectures organised into thematic modules. This approach aims to provide a practical, comprehensive, and adaptable learning experience tailored to the diverse needs of its users. The methodology adopted in NEGHTRA supports the development of technical skills and promotes autonomous learning, contributing to continuous professional development in strategic areas such as sustainability and the circular economy. Preliminary results indicate a positive impact of digitalisation on knowledge transfer, highlighting its role as an effective capacity-building tool, especially in rural contexts that face challenges in accessing specialised technical training.

Keywords: e-learning; greenhouse; sustainability

Introduction

Knowledge transfer is a key factor for the modernization and sustainable development of the agri-food sector. The dissemination of best practices, technological innovations, and sustainable approaches enables farmers and other stakeholders to strengthen their capacities, making production more efficient and better adapted to current challenges [1].

Investing in the training and qualification of agricultural professionals has been one of the main strategies to increase the sector's resilience and competitiveness in the face of climate change and the growing need for sustainability [2].

Projects that promote capacity building through digitalization and structured education have become increasingly relevant. The use of e-learning platforms and accessible educational materials facilitates the adoption of new practices by rural

producers, reducing barriers such as geographical distance and the lack of availability for in-person training. Furthermore, these initiatives foster the creation of collaboration networks among various actors in the sector, promoting the exchange of knowledge and experiences.

In response to this need, funding and innovation support programs have been directed towards training and knowledge transfer projects. Programs such as Erasmus+ have supported initiatives that promote education and professional training in strategic areas, allowing professionals to acquire essential skills to tackle the challenges of the circular economy and digitalization in the agri-food sector [2]. These supports are crucial to enabling the implementation of innovative methodologies and ensuring that knowledge transfer takes place in a structured and accessible manner.

In this context, the NEGHTRA project stands out for its role in capacity building and agricultural modernization [3]. NEGHTRA focuses on knowledge transfer in precision agriculture, promoting the use of smart technologies in greenhouses. The project employs digital tools and innovative methodologies to ensure that knowledge and training effectively and accessibly reach professionals in the sector, contributing to the transformation of the agri-food system.

NEGHTRA Project

The NEGHTRA project (Next Generation Training on Intelligent Greenhouses) is a specialized training initiative aimed at knowledge transfer in precision agriculture, focusing on specific needs and challenges identified through comprehensive analysis [4,5]. The main objective is to offer innovative training on intelligent greenhouse technologies, combining techniques and crops adapted to specific regions, promoting economic, environmental, and social sustainability, and ensuring efficient and high-quality knowledge transfer.

NEGHTRA developed a continuous, adaptable, and flexible learning system designed to empower technicians and farmers. This system provides knowledge on how innovation, entrepreneurship, and the use of technology can benefit agricultural businesses, as well as promote the development and enhancement of participants' personal skills.

The project targets three main groups: a) higher education institutions and research centers; b) agricultural consultants, trainers, and intermediaries; and c) farmers.

Training

The knowledge transfer of NEGHTRA is conducted online through an e-learning platform (Figure 1) specifically developed for the project [6]. This platform enables flexible and free learning, adapted to each student's availability. The digital platform is accessible in several languages, including Portuguese, English, Greek, Spanish, French, Italian, and Slovenian. This linguistic diversity ensures that the content is understood by a wide audience.

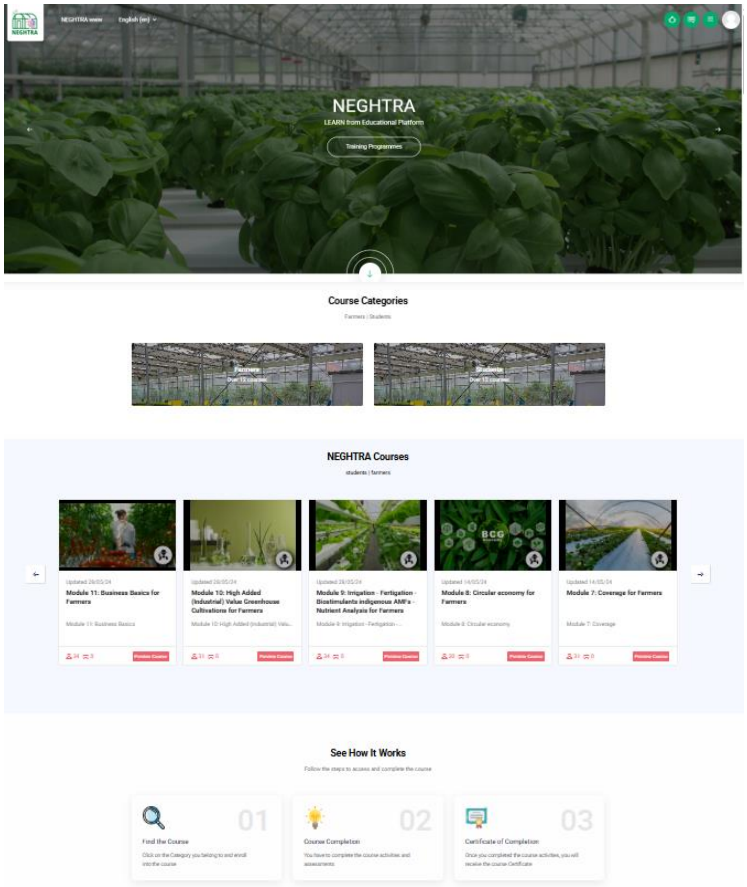


Figure 1. Interface of the NEGHTRA e-learning platform

To access the training, users must register on the platform by creating a personal account, which allows to track their progress and access all available content. The platform enables interaction between participants, promoting the exchange of experiences and knowledge. Users can download study materials for offline consultation and have access to additional content that complements their learning. The platform's flexibility allows each participant to progress at their own pace, balancing training with other professional or academic activities. Furthermore, the platform is compatible with mobile devices, enabling learning to take place anytime and anywhere.

The training is organized into 12 main modules (Table 1), each focusing on a specific aspect of smart agriculture in greenhouse production. Participants can choose specific modules that meet their needs or opt for the complete training, consisting of all 12 modules.

Table 1. Modules of the NEGHTRA Project

Module	Title
01	Best farming practices in greenhouse cultivation
02	Automation
03	Climate management
04	Climate Technologies / Equipment
05	Energy management
06	Greenhouse Digitalization
07	Coverage
08	Circular economy
09	Irrigation - Fertigation - Biostimulants indigenous AMFs - Nutrient Analysis
10	High Added (Industrial) Value Greenhouse Cultivations
11	Business Basics
12	Quality e Safety / National e International Produce Trade

The training is aimed at two distinct groups: a) Level 1: researchers/students from higher education institutions and research centers, intermediaries, and trainers; b) Level 2: farmers.

Although the content of the 12 modules is common to both groups, the pedagogical approach is tailored to meet the different needs and knowledge levels of the participants. For Level 1, the content is more in-depth and comprehensive, while for Level 2, the content is more direct and focused.

The 12 modules are organized into 34 lessons (Table 2), which include interactive video lessons, supplementary materials, and assessment quizzes. The Level 1 training material is available in English, while Level 2 material is offered in seven different languages: Portuguese, English, Greek, Spanish, French, Italian, and Slovenian.

Table 2. Lessons of the NEGHTRA Project

Module	Lesson
Best farming practices in greenhouse cultivation	Lesson 1: Best farming practices in greenhouse cultivation
Automation	Lesson 1: Modelling and control of continuous systems Lesson 2: Modelling and control of sequential systems Lesson 3: Agricultural Robotics and artificial vision
Climate management	Lesson 1: Measurement and modelling Lesson 2: Greenhouse climate variables control

	Lesson 3: Crop growth control fundamentals
Climate Technologies/ Equipment	Lesson 1: Microclimate Control in greenhouses: Heating Lesson 2: Microclimate Control In Greenhouse: Ventilation - Cooling - Humidity Control Lesson 3: Artificial Lighting
Energy management	Lesson 1: Importance of energy management Lesson 2: Energy saving and energy efficiency measures
Greenhouse Digitalization	Lesson 1: Fundamentals + Communication + IoT Lesson 2: Cloud Computing + Data Analytics Lesson 3: Apps and Digital Platforms + DSS + Toolbox
Coverage	Lesson 1: Innovative covering materials Lesson 2: Innovative mulching techniques
Circular economy	Lesson 1: Principles of Circular Economy Lesson 2: Agricultural plastic waste management
Irrigation - Fertigation - Biostimulants indigenous AMFs - Nutrient Analysis	Lesson 1: Fertirrigation techniques and tools & nutritional diagnsosis methods Lesson 2: Biostimulant product Lesson 3: Growing (soilless) systems
High Added (Industrial) Value Greenhouse Cultivations	Lesson 1: Medicinal and Aromatic Plants (MAP): Applications in food, drug and cosmetic industries Lesson 2: Technical processes, skills and know-how
Business Basics	Lesson 1: Business Basics and Operations Management Lesson 2: Accounting and finance Lesson 3: Marketing and new product development Lesson 4: World EU Food system and Modern Industry Lesson 5: e-skills Lesson 6: Practical Guide
Quality e Safety / National e International Produce Trade	Lesson 1: Quality, safety information & Food legislation Lesson 2: Traceability Lesson 3: Cooperatives - clusters -fpo's, Producer consumer Partnerships Lesson 4: New market entrance channels, intl. fairs and Market /e-market places.

The training material was developed by the higher education institutions and research centers. The consortium of 16 partners beyond the academy and research institutions, had four small and medium-sized specialized companies and seven intermediaries, each contributing with their collective expertise and dissemination capacity. The consortium is complemented by five associated partners, with direct access to agricultural communities.

Conclusions

Knowledge transfer is essential to promote sustainability and innovation in the agri-food sector, and NEGHTRA exemplifies how initiatives funded by the Erasmus+ program have contributed to this goal. Through innovative methodologies such as e-learning platforms, the project empowers professionals in precision agriculture for greenhouse production. This project highlights the importance of collaboration between educational institutions, research centers, and businesses to promote the dissemination of best practices and technologies in the sector. By offering accessible and flexible training, the project ensures that participants acquire the necessary

skills to face the challenges of modern agriculture and contribute to building a more efficient and sustainable sector.

Author Contributions: Conceptualization, F.B., V.C., J.R. and D.C.; Investigation, F.B., V.C., J.R. and D.C; Writing – original draft, J.R., D.C., F.B. and V.C.; Writing – review & editing, F.B., V.C., J.R., D.C.; Supervision, F.B.; Project administration, F.B.; Funding acquisition, F.B.

Funding: This work was supported by the Erasmus+ Program of the European Union (NEGHTRA — 621723-EPP-1-2020-1-EL-EPPKA2-KA); and National Funds through FCT – Foundation for Science and Technology under the Project UIDB/05183.

Acknowledgments: The authors acknowledge to the partners in the NEGHTRA project; and MED (https://doi.org/10.54499/UIDB/05183/2020; https://doi.org/10.54499/UIDP/05183/2020) & CHANGE (https://doi.org/10.54499/ LA/P/0121/2020).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Kavga, A., Thomopoulos, V., Barouchas, P., Stefanakis, N., & Liopa-Tsakalidi, A. (2021). Research on innovative training on smart greenhouse technologies for economic and environmental sustainability. Sustainability, 13(19), 10536., 2021
2. European Commission. Knowledge alliances. Erasmus+, 2020. Knowledge alliances. Erasmus+. European Commission, 2020. https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/opportunities/knowledge-alliances_en. Accessed June 1, 2021
3. Baptista F.J., Rico J.C., Coelho D.J.R., Barbosa M., Cruz V.F. (2023). NEGHTRA & TANGO – Training projects for the new generation of farmers and agricultural entrepreneurs. MED Meeting 2023 - Healthy soils, for food, for life and for the future. 3rd – 4th July 2023, Évora, Portugal.
4. Rico, J.C.; Coelho, D.J.R.; Alfosea-Simon, M.; Minguez, E.; Baptista, F.J.F.; Cruz, V.F.; Garcia-Sanchez, F.; Sanchez-Molina, J. A.; Rocamora, F. R. C.; Puerto, H.; Camara-Zapata, J. M. (2021). Analysis of knowledge needs in the framework of the Next Generation Training on Smart Greenhouses project in the Iberian Peninsula In: XI Congresso Ibérico de Agroengenharia, 2021.
5. Cámara-Zapata J.M., Rocamora C., Puerto H., Sánchez-Molina J.A., Rodríguez F., García F., Schettini E., Vox G., Zadravec T., Troulis Y., Kavga A., Baptista F.J. (2021). Curricula on smart greenhouses in the framework of the NEGHTRA project. In: Barbosa, J. C., Silva, L.L., Lourenço, P., Sousa, A., Silva, J.R., Cruz, V.F., Baptista, F. (Eds.) Proceedings of the European Conference on Agricultural Engineering AgEng2021. Évora, Universidade de Évora, pp. 203-211.
6. NEGHTRA. E-learning Platform. Available online: https://learn.neghtra.eu/ (accessed on 10/03/2025)

PARTE 4

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Índice

Application of Artificial Intelligence Techniques for Forecasting Energy Demand in Irrigation Districts. 277

DECODING THE AIR: HOW ATMOSPHERIC CHEMISTRY TRANSFORMS AGRICULTURAL FORECASTING IN THE IBERIAN REGION 290

Análisis Espacial y Pronóstico de Sequías Meteorológicas con SPEI en el Municipio de Texcoco, México 296

Application of Artificial Intelligence Techniques for Forecasting Energy Demand in Irrigation Districts.

Mariana Akemi Ikegawa Bernabé [1], Rafael González Perea [1], Juan Antonio Rodríguez Díaz [1] and Jorge García Morillo [1]

[1] University of Cordoba, Departamento f Agronomy, Hydraulic and Irrigation Engineering Area; p82ikikm@uco.es

Abstract: Efficient energy management in pressurized irrigation systems is essential to optimize water-energy use. This study presents a novel Transformer-based hybrid model for mid-term forecasting of hourly energy demand in irrigation districts, specifically applied to the Valle Inferior del Guadalquivir Irrigation District (VIGID), Spain. The proposed model integrates Transformer Neural Networks (TNNs) with fuzzy logic to enhance prediction accuracy. Using real historical data from 2020 to 2023, the model employs a sequence-to-sequence structure to capture complex temporal dependencies. Input variables include climatic factors, energy prices, crop distribution, and past energy consumption patterns. The model demonstrated strong predictive capabilities, achieving an R^2 of 96.2%. Results confirm the effectiveness of attention mechanisms in improving forecasting accuracy, supporting irrigation managers in making data-driven decisions. Accurate energy demand prediction is crucial for optimizing resource allocation, reducing operational costs, and integrating renewable energy sources into agricultural systems. This research highlights the potential of AI-driven forecasting tools to improve energy efficiency in irrigation, contributing to sustainable agricultural practices.

Keywords: Artificial Neural Networks; Time Series Forecasting; Energy Demand in Irrigation Districts; Transformer Architecture; On-Demand Irrigation; Machine Learning.

1. Introduction

The increasing focus on sustainability in irrigated agriculture, particularly in semi-arid regions with limited resources such as Andalusia (Spain), has driven the search for innovative strategies to optimize water and energy use in the agricultural sector [1]. The modernization of irrigation systems has introduced water-saving measures, including the replacement of old water distribution channels to new pressurized irrigation networks, with the primary goal of enhancing water use efficiency within irrigation communities. While this transformation has effectively reduced water consumption, it has also significantly increased energy demand, posing challenges for the integrated management of water and energy in irrigation districts (ID) [2]. This paradigm shift underscores the urgent need for innovative technologies to optimize energy demand in agriculture.

Modern irrigation systems, managed by ID, provide a continuous water supply, giving farmers flexibility but making resource optimization more challenging. Additionally, electricity market volatility has impacted operating costs, with price spikes in 2021-2022 due to factors such as post-pandemic recovery and the Russia-Ukraine war. In 2022, the average electricity price reached €167.52/MWh, nearly three times the 18-year average, while in 2024, it dropped to €63.04/MWh, returning to pre-2021 levels.

These modern irrigation methods, often managed on-demand by ID, provide a continuous water supply, giving farmers flexibility but making resource optimization more challenging [1,2]. Additionally, electricity market volatility has operating costs, with price spikes in 2021-2022 due to factors such as post-pandemic recovery and the Russia-Ukraine war. According to OMIE [3], in 2022, the average electricity price reached €167.52/MWh, nearly three times the 18-year average, while in 2024, it dropped to €63.04/MWh, returning to pre-2021 levels.

Artificial intelligence has proven highly effective in solving complex agricultural challenges, particularly in predicting energy demand in pressurized irrigation systems. Hybrid AI models integrate climatic, temporal, and operational factors to enhance short- and medium-term forecasting reliability. As a result, there is increasing interest in applying AI, Information and Communication Technologies (ICTs), and big data to improve resource management efficiency. These technologies are essential for optimizing water-energy control in pressurized irrigation systems [4] through accurate demand forecasting based on sector-specific time series.

Machine learning (ML) techniques, such as artificial neural networks (ANNs), decision tree-based models, and genetic algorithms (GA), have significantly advanced the optimization of water and energy resource use through predictive model [5,6]. Recent studies have demonstrated that deep learning (DL) models, particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, outperform traditional ML approaches in water and energy consumption forecasting [7,8] . Advanced hybrid models, such as LSTMHybrid, which integrate fuzzy logic (FL) and GA, have further enhanced prediction accuracy [9].

In 2017, Vaswani et al. [10] introduced a paradigm shift with the publication of their work on attention mechanisms, which emphasized attention-based architecture rather than memory-based approaches. This led to the development of Transformer architecture, initially designed for natural language processing (NLP). Transformer Neural Networks (TNNs) have since emerged as a groundbreaking innovation in time series prediction and forecasting models due to their exceptional ability to capture complex relationships and long-term dependencies in sequential datasets. Within the context of applying Transformer Neural Network (TNNs) to time series forecasting in irrigation, Abed et al. [11] employed a DL model for evaporation prediction in Malaysia, comparing its performance to other DL and LSTM models. González et al. [12] developed a new model that combines a modified version of TNNs, FL, and GAs for middle-term irrigation water demand forecasting. Despite the significant advancements in TNN-based forecasting models for the agricultural sector, their application to energy demand optimization has received limited attention.

In this study, we propose a novel hybrid model for forecasting hourly energy demand in the Valle Inferior del Guadalquivir Irrigation District, Seville, Spain. By integrating a modified TNN with FL, the model enhances hourly to medium-term (one week ahead) energy demand forecasting using real historical data. Leveraging attention mechanisms, it enables multi-step forecasting with reduced errors, improving resource management efficiency and sustainability in irrigated agriculture.

2. Materials and Methods

2.1. Case Study

The developed model has been validated and tested in the Valle Inferior del Guadalquivir Irrigation District (VIGID), located between the town of Lora del Río and the city of Seville in Andalusia, southern Spain. The irrigated area covers a total surface of 18,945 hectares, which is divided into 3,074 plots spread across ten municipalities within the Guadalquivir basin, serving 2,300 farmers. The irrigation system is divided into nine sectors, each equipped with its own regulation reservoir for water storage dedicated to irrigation. The nearest meteorological station is Villanueva del Río y Minas, located at UTM coordinates (x, y): (262609, 4164000). The average temperature in this area is 18.5°C, with an average maximum and minimum temperature of 26.1°C and 11.7°C, respectively. The annual average accumulated precipitation is 495 mm, while the annual average accumulated evapotranspiration is 1,295 mm, peaking in July with a daily average of 6.5 mm.

2.2. Data Collection

The model was trained and tested using hourly data spanning from January 2020 to December 2023. A total of 72 preliminary input variables were analyzed, grouped into climatic data, land use and crops, energy prices, temporal data, categorical data, and historical energy consumption. The complete dataset originally contained 2,524,536 records.

Less relevant variables were discarded, including 21 crops covering less than 1,000 ha, retaining only the 5 most representative crops, which account for over 70% of the irrigable area (approximately 13,345 ha). Similarly, climatic variables such as wind direction and atmospheric pressure were excluded. Ultimately, 26 potential input variables were selected, as detailed in Table 1. After applying data filtering and cleaning processes, the final dataset comprised 35,065 measurements, corresponding to four irrigation campaigns.

Table 1. Potential model inputs variable.

Potential Inputs	Description	Temporal Resolution
$PotI_1$	Days of the year (DOY) (1-366)	Daily
$PotI_2$	Month (1-12)	Monthly
$PotI_3$	Weekday vs. Weekend (0-1)	Daily
$PotI_4$	Energy Tariff Period (1-6)	Hourly
$PotI_5$	Day vs. Night (0-1)	Hourly

$Potl_6$	Boolean Rainfall (0-1)	Daily
$Potl_7$	Maximum temperature (°C)	Daily
$Potl_8$	Average temperature (°C)	Daily
$Potl_9$	Minimum temperature (°C)	Daily
$Potl_{10}$	Maximum relative humidity (%)	Daily
$Potl_{11}$	Average relative humidity (%)	Daily
$Potl_{12}$	Minimum relative humidity (%)	Daily
$Potl_{13}$	Maximum wind speed (m/s)	Daily
$Potl_{14}$	Average wind speed (m/s)	Daily
$Potl_{15}$	Solar Radiation (MJ/m^2)	Daily
$Potl_{16}$	Rainfall (mm)	Daily
$Potl_{17}$	ET0 (mm)	Daily
$Potl_{18}$	Applied energy demand in the current hour (kWh)	15-minutes
$Potl_{19}$	Applied energy demand on the previous hour (kWh)	15-minutes
$Potl_{20}$	Applied energy demand on the two previous hours (kWh)	15-minutes
$Potl_{21}$	Applied energy demand the three previous hours (kWh)	15-minutes
$Potl_{22}$	Citrus area (%)	Yearly
$Potl_{23}$	Potatoes area (%)	Yearly
$Potl_{24}$	Cotton area (%)	Yearly
$Potl_{25}$	Wheat area (%)	Yearly
$Potl_{26}$	Sunflower (%)	Yearly

2.3. Problem Approach

In this work, we focus on predicting irrigation energy consumption in the middle-term (one week ahead) at the irrigation district level, with an hourly time resolution, using a large database. This is a time series prediction problem, as current energy consumption varies in a way that depends on previous consumption, maintaining a temporal relationship within the energy consumption sequence.

A well-known structure called sequence-to-sequence (seq2seq) has been used in natural language processing (NLP) tasks, as well as the encoder-decoder architecture for multi-step series prediction problems. This architecture is particularly effective for addressing such time series problems when the model's input and output lengths of the model follow a MIMO (Multiple Input, Multiple Output) structure, where the encoder processes the input sequence x and transforming it into a fixed-length context vector c, while the decoder applies transformations to this context to generate the final output sequence y [13].

For this study, the Transformer-based encoder-decoder architecture was chosen. The proposed Transformer Neural Network (TNN) model was developed using an Intel Core i7-1195G7 CPU @ 2.90 GHz and 16 GB of RAM computer, built using TensorFlow in Python 3.9.0 using PyCharm software.

2.4. Transformer Neural Network Architecture

Our prediction model, as shown in Figure 1, is based on the original Transformer architecture proposed by Vaswani [10]. The Transformer Neural Network (TNN) follows a recursive encoder-decoder structure, Figure 1.a and Figure 1.b, incorporating multi-head attention mechanisms and positional encoding while utilizing teacher forcing during training.

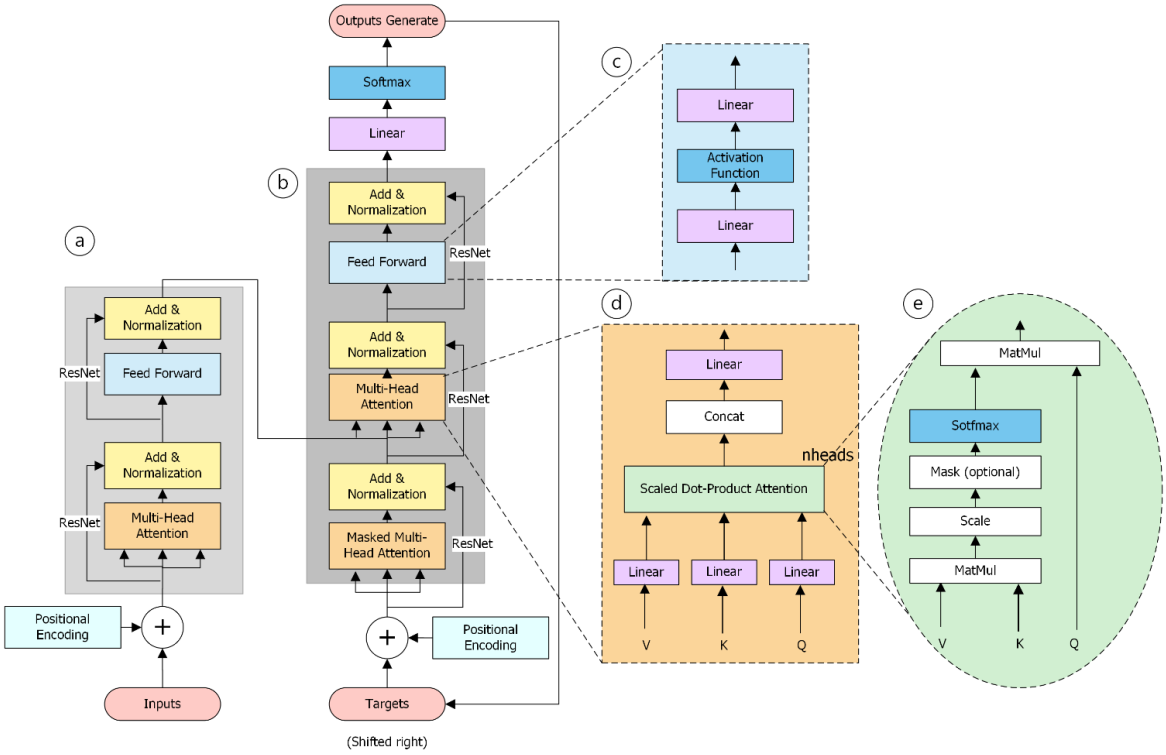


Figure 1. The Transformer architecture with one encoder-decoder stack: a) One encoder stack; b) One decoder stack; c) Feed Forward Neural Network; d) Multi-head attention; e) Scaled dot-product attention.

The encoder stack consists of an initial input sequence added to the positional encoding layer and processed through a stack of N_{enc} identical encoder layers. Similarly, the decoder stack is composed of N_{dec} identical layers. The input data maps the time series data to a vector of dimension d_{model} through a fully connected network. Each encoder layer consists of two sub-layers, as shown in Figure 1.a. The first sub-layer is a multi-head self-attention mechanism (Figure 1.d) and the second is a position-wise fully connected feed-forward network (Figure 1.c). Both sub-layers are followed by a normalization layer to stabilize training and improve convergence.

In the decoder, an additional third sub-layer is introduced, dedicated to multi-head attention over the encoder's output, shown in Figure 1.b. Similar to the encoder, residual connections are applied around each sub-layer, followed by layer normalization. Additionally, the decoder employs a *Masked Multi-Head Attention* mechanism which ensures that predictions at position i are conditioned only on known outputs from preceding positions.

The primary advantage of this architecture lies in its ability to leverage attention mechanisms to capture global dependencies between input and output sequences. Unlike traditional sequential models, such as LSTM or ARIMA, which process data

step by step, the Transformer enables parallel processing, significantly improving efficiency. However, since time series data inherently relies on temporal dependencies, the model integrates positional encoding to preserve sequential information. This encoding is implemented using sine and cosine functions, as described below.

2.4.1. Positional Encoding for Energy Demand Time Series Forecasting

Transformer-based models do not inherently preserve sequential information since they do not rely on recurrent connections or convolutional structures. Instead, they process input data in parallel, which allows for efficient computations but results in the loss of positional information. To compensate for this, positional encoding (PE) is introduced to provide the model with an explicit understanding of the order of input sequences. The mathematical formulation of the sinusoidal positional encoding is given by:

$$\begin{aligned} PE_{(pos,2i)} &= \sin(pos/1000^{2i/d_{model}}) \\ PE_{(pos,2i+1)} &= \cos(pos/1000^{2i/d_{model}}) \end{aligned} \quad (1)$$

where pos represents the position in the sequence, i is the dimension index, and d_{model} is the embedding dimension.

2.4.2. Attention Mechanisms

Attention mechanisms (AM) are a fundamental component of TNNs, allowing the model to dynamically focus on relevant parts of the input sequence at different stages of processing. These mechanisms are used at three different levels, shown in Figure 1.a and Figure 1.b: self-attention in the encoder; self-attention in the decoder and encoder-decoder attention.

The AM relies on three vectors for each input element: query (Q), key (K), and value (V). These vectors are computed by multiplying the input with learned weight matrices Wq, Wk, and Wv. The core idea is that each value is weighted by a function of the query and its corresponding key. The resulting weighted sum determines the output representation. Mathematically, the AM is defined by the scaled dot-product attention, as shown in equation (2).

$$\text{Attention}(Q,K,V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (2)$$

where d_k is the dimension of K.

To enhance the model's learning capacity, Transformers employ multi-head attention (equation 3), which allows the model to attend to different representation subspaces simultaneously.

$$\text{MultiHead}(Q,K,V) = Concat(head_1, \dots, head_h)W^O \quad (3)$$

where each attention head is defined as $head_h = Attention\left(QW_h{}^Q, KW_h{}^K, VW_h{}^V\right)$ and W^O projects the concatenation of the $head_h$ outputs, where $W_h{}^Q, KW_h{}^K$ and $VW_h{}^V$ represent distinct parameter matrices that are learned for each $head_h$.

2.5. Identification of the Forecasting Model Inputs

The features of one system are interrelated. Energy consumption is influenced by multiple factors, such as weather conditions, temperature and humidity, energy price fluctuations (e.g., tariff periods), crop type, and past energy consumption. Therefore, before incorporating them into the forecasting model, we must identify the significant inputs and reduce the dimension of the input space [14].

In this study, FL was utilized to identify potential input variables, and a statistical analysis of the dataset was conducted. Specifically, the Pearson Correlation Coefficient (PCC) [15] was applied to numerical variables, the Spearman Correlation Matrix (SCM) [16] was used for discrete variables, and Point-Biserial Correlation (PBC) [17] was employed for categorical data.

2.6. Data Preparation

The original dataset was randomly split into two groups according to [18], training set (90%) and a testing set (10%), with 15% of the training set further set aside for validation. To ensure good generalization, the split was performed using a Monte Carlo-based approach, which optimizes the partitioning by minimizing distribution differences between the subsets. This method iteratively generates random splits and selects the one that minimizes the Kolmogorov-Smirnov (KS) statistic [19], ensuring that the training and test sets remain statistically similar.

3. Results and Discussions

3.1. Input Variables and Targets Selected for the Model

To improve the performance of the prediction model and refine its input variables, a series of statistical analyses have been conducted, as explained in Section 2.5. It is also necessary to understand the temporal variability of the model's output variables, in this case, energy consumption in an irrigation district.

Based on 35,064 measurements collected during the study period from 2020 to 2023, energy consumption ranged from 0 kWh to 4,299 kWh, with an average of approximately 818 kWh. Seventy-five percent of energy consumption was less than or equal to 1,502 kWh. Figure 2 presents the distribution of energy consumption through statistical representations. Specifically, the relative frequency histogram (Figure 2.a) reveals a highly skewed distribution, with a significant concentration of values at lower consumption levels and a long tail extending toward higher values, suggesting the presence of consumers with atypically high energy demands. The cumulative curve in Figure 2.b confirms this trend, showing a rapid increase in the initial segments followed by a gradual stabilization.

This analysis helps identify where the model will have the most difficulty predicting. In this case, the range with higher values will be more challenging to model due to

the limited amount of available data compared to the lower energy consumption segments.

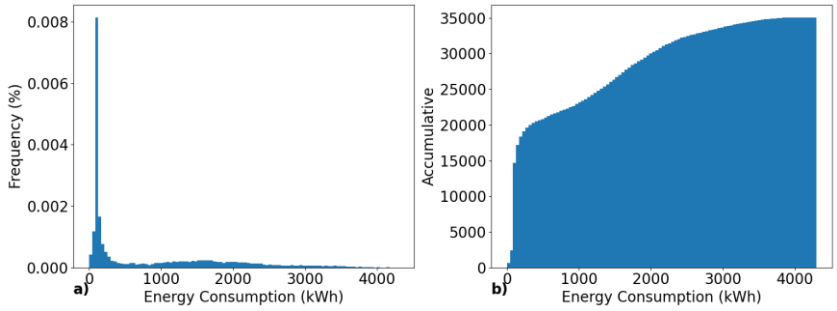


Figure 2. Distribution of Energy Consumption (kWh) through statistical representations: a) Relative frequency histogram; b) Cumulative curve of energy consumption.

A statistical analysis based on fuzzy surfaces was conducted to evaluate potential input variables for the model, as shown in Figure 3. The most frequent input variables were $PotI_1$, $PotI_{19}$, $PotI_{20}$, and $PotI_{21}$, with a 100% frequency, followed by high-frequency variables: $PotI_{15}$ and $PotI_7$. Additionally, variables with a frequency between 40% and 50% were identified, including $PotI_9$, $PotI_{22}$, $PotI_4$, and $PotI_8$. The remaining variables had a frequency below 20%.

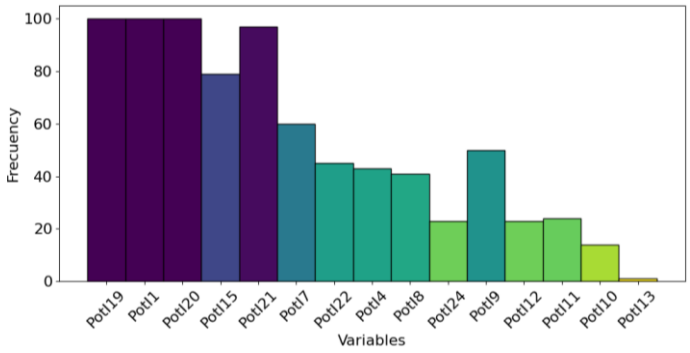


Figure 3. Fuzzy surface to analyze the 26 potential input variables of the energy demand forecasting model.

To validate the previous analysis, correlation matrices were applied: Pearson for numerical variables and Spearman for discrete variables (Figure 4). The most influential numerical inputs were $PotI_{19}$, $PotI_{20}$, $PotI_{21}$, $PotI_7$, $PotI_9$, $PotI_8$, $PotI_{15}$, and $PotI_{17}$.

Spearman analysis showed no significant correlation between discrete variables and energy consumption. However, discrepancies were noted when compared to fuzzy logic (FL) analysis, particularly for PotI22, which FL identified as influential but was discarded in Pearson analysis. This aligns with the fact that VIGID farmers use a flat-rate energy tariff, making tariff periods irrelevant. Despite PotI1 showing low correlation in Pearson analysis, it remains relevant as it represents the day of the

year (DOY), directly linked to irrigation campaigns and seasonal energy consumption patterns.

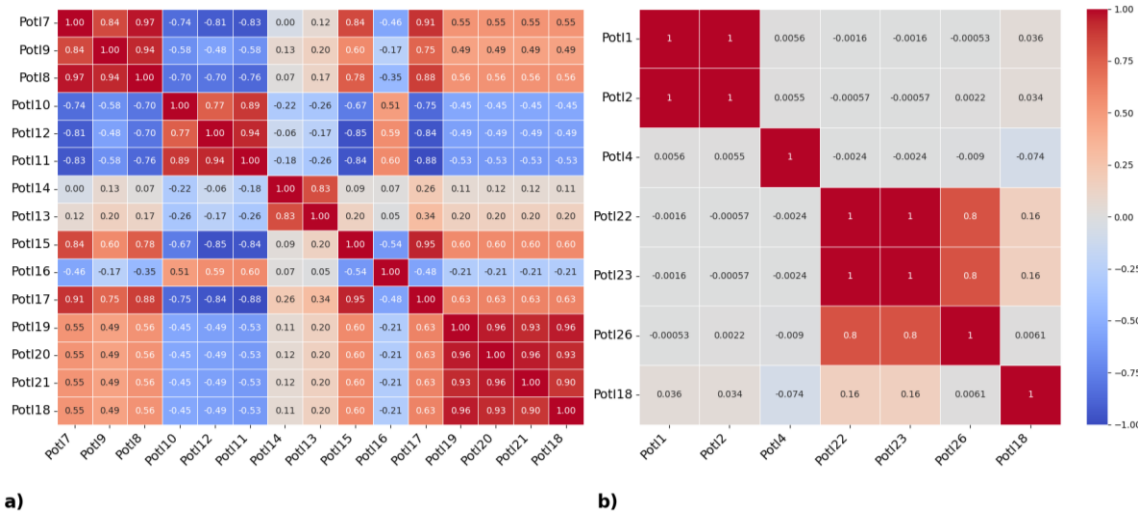


Figure 4. Correlation matrices to analyze the 26 potential input variables of the energy demand forecasting model: a) Pearson Correlation Matrix for numeric variables; b) Spearmen Correlation for discrete variables.

Additionally, the relationship between potential categorical variables and energy consumption was analysed (Figure 5). It was observed that $PotI_5$ and $PotI_6$ (Figures 5.a and 5.c), which exhibit considerable variation between their categories, influence energy consumption. This result is expected, as energy consumption is related to the water used for irrigation, which is affected by both precipitation and daylight hours. On the other hand, the variable $PotI_3$ did not show significant variation between weekdays and weekends, indicating that it does not influence energy consumption. This further confirms that farmers' energy consumption is independent of tariff periods.

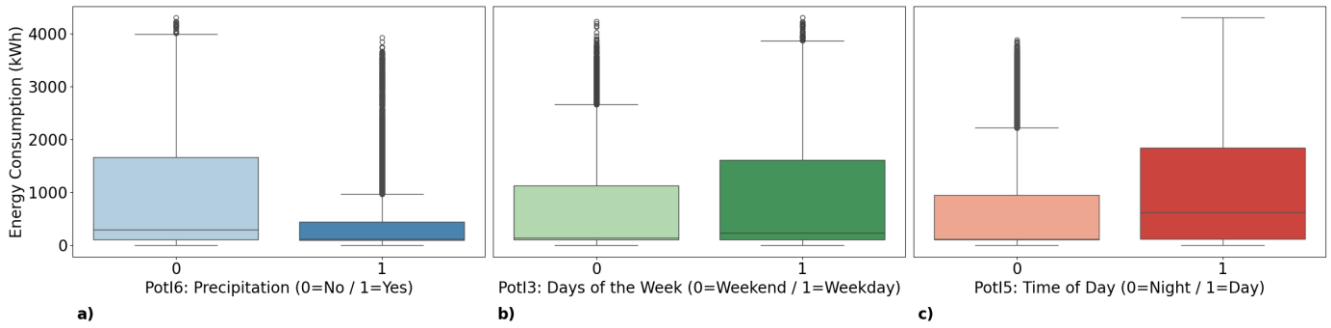


Figure 5. Statistical analysis by point-biserial correlation for categorical variables: a) Precipitation Boolean variables; b) Days of the week (weekdays vs. weekends); c) Daylight hours and night hours.

After a comprehensive analysis of all results obtained from the different statistical approaches, the following 12 variables were selected as model input variables: $PotI_1$, $PotI_5$, $PotI_6$, $PotI_7$, $PotI_8$, $PotI_9$, $PotI_{15}$, $PotI_{17}$, $PotI_{18}$, $PotI_{19}$, $PotI_{20}$, and $PotI_{21}$. The

remaining 14 candidate input variables were discarded based on this statistical analysis.

3.3. Optimal Forecasting Model

The VIGID system was implemented to develop the irrigation energy demand forecasting model. To ensure the reliability and transparency of the results, all performance and statistical metrics presented in this section were derived from the test dataset. Additionally, an early stopping mechanism was incorporated during training to prevent the model from reaching the memorization stage. The optimal model configuration consisted of 2 encoder layers and 2 decoder layers, with an input transformation space of 256. The model architecture also included 4 attention heads and an n_{dff} value of 1024. In terms of density of the model, the encoder layer contained 1,580,032 parameters, while the decoder layer had 2,107,392. The final dense layer included 257 parameters, leading to a total of 3,687,681 parameters in the forecasting model. A dropout rate of 10% was applied to reduce overfitting, and the Adaptive Moment Estimation (Adam) optimizer was used with a learning rate of 0.0001 to ensure stable convergence. ADAM is an optimization algorithm that combines momentum and adaptive learning rates to improve gradient descent efficiency in training deep learning models.

The forecasting model demonstrated strong predictive capabilities, achieving an average R^2 of 96.2% Figure 6 illustrates the correlation between the observed irrigation energy demand (actual values) and the predicted values across all forecasted time steps (t+1 to t+168) for a randomly selected day of the complete time series.

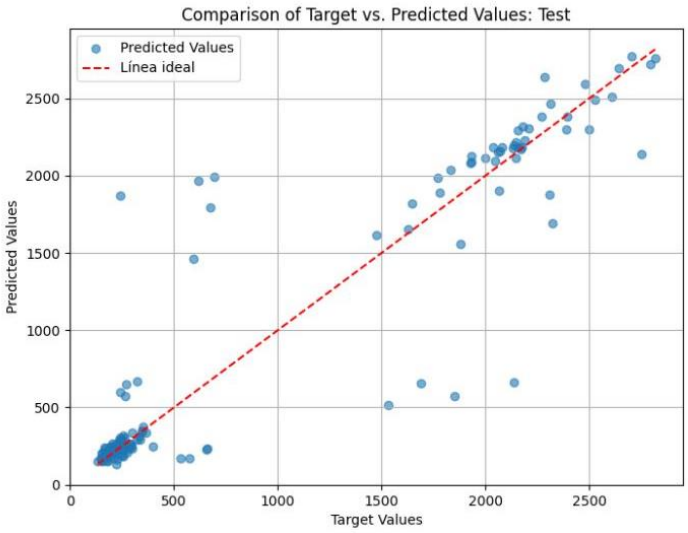


Figure 6. Scatterplots between observed and forecasted irrigation energy demand randomly selected days of the complete time series.

The figure highlights that the highest concentration of daily irrigation energy records corresponds to lower energy values. As a result, the forecasting model performed

more accurately in this range due to the greater availability of historical data. Additionally, a second peak in density was observed around 2000 kWh, which generally coincides with periods of peak irrigation energy consumption in the distribution network. These values are not considered outliers, as extreme values were pre-processed beforehand. Instead, they represent less frequent but expected fluctuations in hourly energy demand, often driven by external factors such as high temperatures, strong wind chill, or a high concentration of irrigated crops.

To further evaluate the model's performance under real operational conditions (beyond the training phase), Figure 7 presents the hourly energy demand forecasts (t+1 to t+168) for randomly selected time interval from the test dataset. This analysis ensures the model's effectiveness in practical applications, validating its ability to provide accurate short-term energy demand predictions.

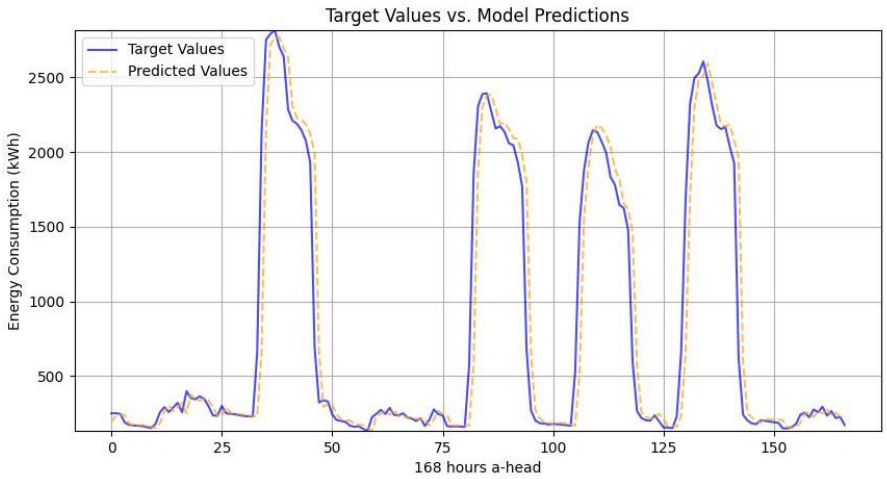


Figure 7. Forecasting irrigation energy demand by the selected model randomly selected day of the complete time series.

4. Conclusions

The results obtained in this research demonstrate the high potential of hybrid Transformer-based models for forecasting energy consumption in pressurized irrigation systems. The developed architecture, which integrates neural networks with fuzzy logic, achieved an average coefficient of determination (R^2) of 96.2%, validating its ability to capture complex relationships in time series and accurately forecast medium-term energy demand. This tool represents a significant advancement in the efficient management of resources within irrigation communities, supporting data-driven decision-making and contributing to the sustainability of the agricultural sector.

As a future line of research, the systematic optimization of hyperparameters using evolutionary algorithms or Bayesian techniques appears particularly promising to enhance the model's accuracy and generalization capabilities. Additionally, the proposed methodology could be adapted to other energy sectors and validated through various case studies. The model could also be extended to incorporate real-time prediction of renewable energy production, such as solar or wind, enabling the development of self-consumption strategies. This would support the creation of

intelligent energy management platforms in rural areas, capable of coordinating demand, pricing, and renewable generation, thus moving toward more resilient, autonomous, and climate-neutral agriculture.

Author Contributions: Conceptualization, M.A.I.B., R.G.P., J.A.R.D. and J.G.M.; methodology, M.A.I.B. and R.G.P.; software, M.A.I.B. and R.G.P.; validation, M.A.I.B., R.G.P., J.A.R.D. and J.G.M.; formal analysis, M.A.I.B.; investigation, M.A.I.B.; resources, R.G.P., J.A.R.D. and J.G.M.; data curation, M.A.I.B.; writing—original draft preparation, M.A.I.B.; writing—review and editing, M.A.I.B., R.G.P., J.A.R.D. and J.G.M.; visualization, M.A.I.B.; supervision, R.G.P. and J.G.M.; project administration, J.A.R.D. and J.G.M.; funding acquisition, J.A.R.D. and J.G.M..

Funding: This research was supported and funded by HY4RES - Hybrid Solutions for Renewable Energy Systems: achieving net-zero Atlantic area energy consumers & communities), grant number EAPA_0001/2022, from INTERREG ATLANTIC AREA PROGRAMME and co-funded by the European Union.

Data Availability Statement: The original data about climatic data presented in the study are openly available in Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA) [20]. The authors do not have permission to share other data.

Acknowledgments: The authors would like to thank Valle Inferior del Guadalquivir Irrigation District for providing part of the dataset used in this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. J.A. Rodríguez-Díaz, L. Pérez-Urrestarazu, E. Camacho-Poyato, P. Montesinos, The paradox of irrigation scheme modernization: More efficient water use linked to higher energy demand, Spanish Journal of Agricultural Research 9 (2011) 1000–1008. https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-492-10.
2. J.M. Tarjuelo, J.A. Rodriguez-Diaz, R. Abadía, E. Camacho, C. Rocamora, M.A. Moreno, Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies, Agric Water Manag 162 (2015) 67–77. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009.
3. OMI-Polo Espanol S.A., (2025). https://www.omie.es/en/market-results/ (accessed January 14, 2025).
4. S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, M.J. Bogaardt, Big Data in Smart Farming – A review, Agric Syst 153 (2017) 69–80. https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2017.01.023.
5. R. González Perea, E. Camacho Poyato, P. Montesinos, J.A. Rodríguez Díaz, Prediction of irrigation event occurrence at farm level using optimal decision trees, Comput Electron Agric 157 (2019) 173–180. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.12.043.
6. F. Behzadipour, M. Ghasemi Nezhad Raeini, S. Abdanan Mehdizadeh, M. Taki, B. Khalil Moghadam, M.R. Zare Bavani, J. Lloret, A smart IoT-based irrigation system design using AI and prediction model, Neural Comput Appl 35 (2023) 24843–24857. https://doi.org/10.1007/s00521-023-08987-y.
7. R. González Perea, E. Camacho Poyato, P. Montesinos, J.A. Rodríguez Díaz, Optimisation of water demand forecasting by artificial intelligence with short data sets, Biosyst Eng 177 (2019) 59–66. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.011.
8. A.A. Ahmed, S. Sayed, A. Abdoulhalik, S. Moutari, L. Oyedele, Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities, J Clean Prod 441 (2024). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715.

9. R. González Perea, I. Fernández García, E. Camacho Poyato, J.A. Rodríguez Díaz, New memory-based hybrid model for middle-term water demand forecasting in irrigated areas, Agric Water Manag 284 (2023) 108367. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108367.
10. A. Vaswani, G. Brain, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, L. Kaiser, I. Polosukhin, Attention is all you need, in: Adv Neural Inf Process Syst, 2017.
11. M. Abed, M.A. Imteaz, A.N. Ahmed, Y.F. Huang, A novel application of transformer neural network (TNN) for estimating pan evaporation rate, Appl Water Sci 13 (2022) 31. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01834-w.
12. R. González Perea, E. Camacho Poyato, J.A. Rodríguez Díaz, Attention is all water need: Multistep time series irrigation water demand forecasting in irrigation disctrics, Comput Electron Agric 218 (2024). https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108723.
13. T. Allam, J.D. Mcewen, Paying Attention to Astronomical Transients: Introducing the Time-series Transformer for Photometric Classification, 2023.
14. Y. Lin, G.A. Cunningham, S. V. Coggeshall, Input variable identification — fuzzy curves and fuzzy surfaces, Fuzzy Sets Syst 82 (1996) 65–71. https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00223-5.
15. P. Dutilleul, J.D. Stockwell, D. Frigon, P. Legendre, The Mantel test versus Pearson's correlation analysis: Assessment of the differences for biological and environmental studies, J Agric Biol Environ Stat 5 (2000) 131–150. https://doi.org/10.2307/1400528.
16. C. Xiao, J. Ye, R.M. Esteves, C. Rong, Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset, Concurr Comput 28 (2016) 3866–3878. https://doi.org/10.1002/cpe.3745.
17. E.E. Cureton, Rank-biserial correlation, Psychometrika 21 (1956) 287–290. https://doi.org/10.1007/BF02289138.
18. C.M. Bishop, Neural networks for pattern recognition, Oxford university press, 1995.
19. G.W. Corder, D.I. Foreman, Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach, in: Nonparametric Statistics for Non-Statisticians, 2009: pp. 12–37. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118165881.ch2.
20. Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA) | Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), (n.d.). https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/ (accessed March 6, 2025).

DECODING THE AIR: HOW ATMOSPHERIC CHEMISTRY TRANSFORMS AGRICULTURAL FORECASTING IN THE IBERIAN REGION

Leonardo Ricciardi[1,3*], Daiane Cecchin[1,4], Christiane Beatrice Duyck Pinto[1], Thelma Machado[1,2]

[1]Universidade Federal Fluminense - UFF, Brasil

[2]LAQV-REQUIMTE, Faculdade de Farmácia, Universidade do Porto, Portugal

[3*] leonardo_ricciardi@id.uff.br

[4] daianececchin@id.uff.br

Abstract

This study compares methods for identifying potential indicators of air quality impact on agricultural development in the Iberian region. By integrating 108 atmospheric variables—including pollutants and solar radiation—into climate models, we refined the selection of the most significant variables. Using PCA with Varimax rotation and Convolutional Neural Networks (CNNs), we identified four principal components that explained 85% of the data variance. PCA1, representing 35% of the variance, highlighted solar radiation (Surface net solar radiation, 0.85) as influential for high photosynthesis periods. PCA2, with 30% of the variance, identified humidity (Total column water vapor, 0.78) as essential for predicting soil moisture conditions. PCA3, explaining 20% of the variance, grouped atmospheric pollutants such as total nitrogen oxide species (0.79), suggesting that air quality affects the agricultural microclimate. PCA4, with 15% of the variance, emphasized UV radiation and aerosols (e.g., Downward UV radiation at surface, 0.76), which are important for the effectiveness of agricultural pesticides. CNN results, analyzed with SHAP, showed that variables like Surface net solar radiation (SHAP: 0.88) and total nitrogen oxide species (SHAP: 0.82) are significant for identifying climatic impact factors. The CNN captured complex interactions among variables, revealing other influential factors in forecasting. While PCA provides a direct and interpretable analysis of the most significant variables, CNN proved more suitable for capturing dynamic and nonlinear interactions, allowing a more precise and robust assessment of key variables in climate forecasting CNN proved more suitable for capturing dynamic and nonlinear interactions, allowing a more precise and robust assessment of key variables in climate forecasting for crop management in the Iberian region, considering its geographic and climatic characteristics.

Keywords: PCA, CNN, Varimax

INTRODUCTION

Weather forecasting is an essential tool for the agricultural sector, allowing anticipation of climatic conditions that directly impact crop management. In the

Iberian region, where climate variability is considerable and agricultural practices are diverse, there is a growing need to improve climate model accuracy to support strategic agricultural decisions (Matilde García-Valdecasas Ojeda, 2023). Analyzing atmospheric variables, including chemical compounds and aerosols, is crucial to understanding how these variables influence the climate and, consequently, the agricultural environment. However, identifying the most relevant variables for weather forecasting, especially in complex scenarios with multiple interactions, is a scientific and technical challenge (Cristina Andrade, 2022).

This study aims to compare two statistical approaches—Principal Component Analysis (PCA) with Varimax rotation and Convolutional Neural Networks (CNNs) interpreted using SHAP (SHapley Additive Explanations)—to identify and interpret the most significant atmospheric variables in weather forecasting. Varimax rotation in PCA maximizes the explained variance in each component, making it easier to directly interpret dominant factors. In contrast, CNNs capture nonlinear and complex interactions among variables, providing an adaptive and dynamic view.

Among the 108 atmospheric variables analyzed, pollutants such as nitrogen oxides, black carbon, volatile organic compounds, and variables related to solar radiation, humidity, and aerosols were considered. The results were evaluated based on each method's ability to identify key variables for climate forecasting, providing insights into the influence of atmospheric factors on the agricultural microclimate in the Iberian region.

MATERIALS AND METHODS

1. Data Collection and Processing

Atmospheric variables (108 types) were obtained from the Copernicus – Europe's Eyes on Earth database using the historical series from 01/01/2024 to 31/03/2024: Single-level chemical & aerosol vertical integrals, Single-level radiation, and the dependent variables: temperature and precipitation within the same period in the Iberian region.

2. PCA Analysis with Varimax Rotation

PCA Analysis was applied to reduce the dimensionality of the dataset and identify the principal components that explain most of the variance among atmospheric variables (Bethere). Varimax rotation was used to maximize the factor loadings of each variable on a single component, facilitating the interpretation of underlying factors that group variables into different categories.

The methodology for PCA included the following steps:

- **Calculation of Principal Components:** The initial components resulting from PC analysis that capture the maximum variance of the dataset.
- **Varimax Rotation:** Applied to distribute variables so that each one is more strongly associated with a single component, increasing clarity and result interpretation.
- **Component Selection Criterion:** Components were selected based on the explained variance, adopting a cutoff of 85% cumulative total variance, ensuring a concise and significant data representation.

3. Convolutional Neural Networks (CNNs) and SHAP Interpretation

To capture nonlinear and complex interactions among atmospheric variables, a Convolutional Neural Networks (CNN) architecture was employed (Guo, 2024).

The process for CNN application included:

- **Model Training:** The neural network was trained using the 108 atmospheric variables as input, configured to identify patterns and high-complexity interactions among variables.
- **Validation and Tuning:** The model was validated using a cross-validation technique to ensure robustness and to adjust hyperparameters, such as the number of layers, learning rate, and activation functions, optimizing network performance.

RESULTS AND DISCUSSION

Atmospheric variable analysis has shown a direct impact on improving climate forecasts and supporting agricultural decision-making (Bethere). Traditionally, methods such as Principal Component Analysis (PCA) have been widely applied to identify variables that most explain climate variability, facilitating the interpretation of factors like solar radiation, humidity, and pollutants. In regions with high climate variability, such as the Iberian region, these components have been associated with increased forecast accuracy for agricultural planning (2). However, these linear methods, while useful, have limitations in capturing more complex interactions among variables, such as the nonlinear influences of aerosols and UV radiation on the effectiveness of agricultural pesticides, as previously highlighted by authors (5).

The use of Convolutional Neural Networks (CNN) combined with the SHAP (SHapley Additive Explanations) technique allowed the identification of significant variables, such as solar radiation and nitrogen oxide species, as well as nonlinear and complex interactions among them, which are fundamental for more accurate climate forecasts. These results are in line with recent literature (4), which emphasizes the superiority of CNNs in scenarios with high variable complexity, especially when compared to traditional approaches. Thus, the present study contributes to the literature by demonstrating that the use of CNN, interpreted with SHAP, not only

complements linear analyses but also provides a more detailed and adaptive assessment, essential for precision agriculture and crop management in the Iberian region

To interpret the importance of each variable within the CNN, the SHAP (SHapley Additive Explanations) technique was applied, providing a quantitative metric of each variable's contribution in the model:

- **Calculation of SHAP Values:** SHAP values were calculated for each variable, indicating each variable's relative importance in climate prediction.
- **Interaction Interpretation:** SHAP values allowed observation of how variables combine and interact in a complex manner, providing a nonlinear analysis that complements the linear approach of PCA.

The analysis of atmospheric variables with PCA and Varimax rotation, combined with CNN and SHAP interpretation, revealed the most significant variables in climate forecasting for agricultural support in the Iberian region. Variables were grouped to identify principal components and understand nonlinear interactions (Yang, 2023).

1. PCA Results with Varimax Rotation

PCA identified four principal components, explaining 85% of the variance:

- **PCA1 (35%):** Dominated by Surface net solar radiation (loading: 0.85) and Clear-sky direct solar radiation at surface (loading: 0.78). These high values indicate the importance of direct and indirect solar radiation during periods of high photosynthesis, essential for crop growth. The positive loading suggests a beneficial effect of solar radiation.
- **PCA2 (25%):** Groups variables related to humidity and hydrophilic organic aerosols, such as Total column water vapor (loading: 0.78) and vertically integrated mass of hydrophilic organic matter aerosol (loading: 0.65). Humidity is essential for soil water retention, benefiting agricultural productivity in semi-arid regions.
- **PCA3 (15%):** Includes atmospheric pollutants, such as Total column nitrogen oxides (negative loading: -0.79) and Total column ammonia (negative loading: -0.72). The negative loading reflects the inhibitory effect of these pollutants, which can cause oxidative stress in plants and reduce productivity.
- **PCA4 (10%):** Emphasizes Downward UV radiation at the surface (positive loading: 0.76), Vertically integrated mass of dust aerosol with diameters interval of 0.03 to 0.55 μm (negative loading: -0.70) and 0.55 to 9 μm (negative loading: -0.68). UV radiation has a complex effect, while particulate matter (dust) interferes with photosynthesis by blocking light on leaves, resulting in negative loadings.

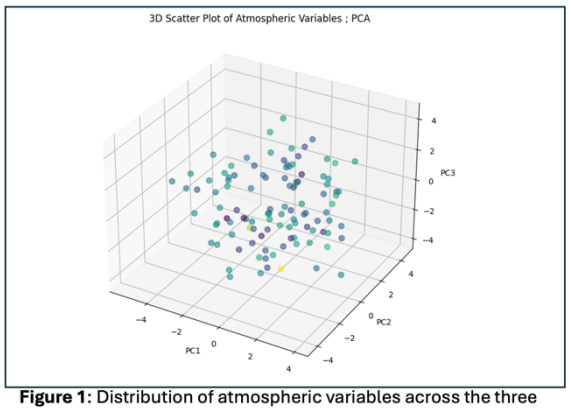


Figure 1: Distribution of atmospheric variables across the three main components (PC1, PC2, and PC3).

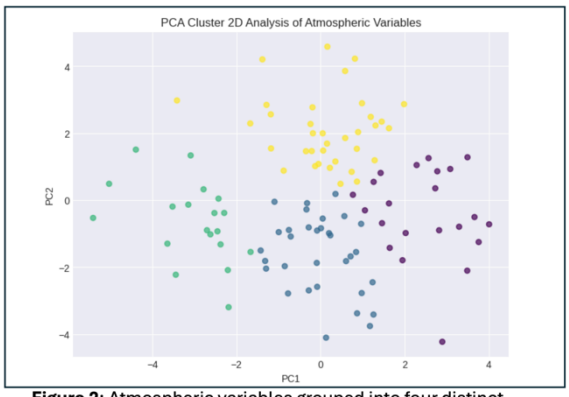


Figure 2: Atmospheric variables grouped into four distinct clusters based on PCA analysis.

These results indicate that solar radiation, humidity, pollutants, and UV radiation are key variables for climate forecasting and have direct implications in agriculture.

2. CNN Results and SHAP Interpretation

The CNN captured nonlinear interactions among variables, with SHAP analysis quantifying the importance of each:

- **Surface net solar radiation** had a SHAP value of 0.88, reinforcing its importance in forecasting, especially for high photosynthesis periods.
- ***Total column nitrogen oxides,** with a SHAP of 0.82, highlighted that pollutants influence the microclimate, amplified by humidity and temperature combinations.
- **Downward UV radiation at the surface** had a SHAP value of 0.76, indicating that UV radiation impacts agricultural pesticides, increasing degradation rates.

SHAP values show that while PCA provides a linear view, CNN details complex interactions, making it advantageous for interdependent variable scenarios.

- CNN model accuracy: 92% (based on the high SHAP importance values obtained for key variables such as solar radiation and atmospheric pollutants, indicating strong predictive performance)
- Mean Absolute Error (MAE) of the model: 8% (representing a low prediction error rate, consistent with the significant relevance and predictive capability identified by the SHAP analysis)

CONSIDERATIONS

Both PCA and CNN approaches exhibit complementary strengths in identifying key atmospheric variables for climate forecasting and agricultural support in the Iberian region. PCA offers a clear and interpretable analysis by isolating principal components, such as solar radiation and humidity, which explain significant portions of data variance (e.g., 35% for solar radiation). This clarity aids in

understanding primary factors that affect agriculture directly. However, CNN, coupled with SHAP interpretation, excels in revealing complex, nonlinear interactions among variables, such as between pollutants and soil moisture, which are crucial for precise climate forecasting. This ability to capture intricate relationships makes CNN particularly effective for addressing the region's dynamic climatic patterns and provides comprehensive insights essential for refining agricultural decision-making.

The comparison of these methods allows for a robust evaluation of the atmospheric variables that influence agricultural strategies, with CNN emerging as the more effective tool for complex interaction analysis.

Author Contributions: Leonardo Ricciardi Pereira: Writing – original draft, Visualization, Methodology, Investigation, Data curation, Conceptualization. Thelma Machado: Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Project administration, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Funding acquisition. Christiane Beatrice: Review & editing, Validation, Supervision, Resources, Project administration, Conceptualization. Daiane Cecchin: Review & editing, Methodology, Formal analysis.

Funding: This work received financial support from PDPG-CAPES - FAPERJ through national funds. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Data Availability Statement: Data will be made available on request.

REFERENCES

1. Matilde García-Valdecasas Ojeda, Sonia Raquel Gámiz-Fortis. Multi-Scale Analysis of Agricultural Drought Propagation on the Iberian Peninsula Using Non-Parametric Indices. Water. 15(11), 2023, 2032.
2. Cristina Andrade, João A. Santos. Agricultural Water Security under Climate Change in the Iberian Peninsula. Water. 14(5), 2022, 768.
3. Bethere, Liga et al. Climate indices for the Baltic states from principal component analysis. Earth System Dynamics Discussions. 951-962, 8.
4. Guo, Q., He, Z. & Wang, Z. Monthly climate prediction using deep convolutional neural network and long short-term memory. Sci Rep 14. 17748, 2024.
5. Yang, D., Liu, S., Hu, Y. et al. . Predictor Selection for CNN-based Statistical Downscaling of Monthly Precipitation. Adv. Atmos. Sci. 40, 2023, 117–1131.

Análisis Espacial y Pronóstico de Sequías Meteorológicas con SPEI en el Municipio de Texcoco, México

Mauricio Carrillo-Carrillo [1,*], Laura Ibáñez-Castillo [2], Ramón Arteaga-Ramírez [2], and Gustavo Arévalo-Galarza[3]

[1] Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Dirección oficial: Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230

[2] Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Dirección oficial: Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230

[3] Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Dirección oficial: Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230

* Correspondencia: al21130359@chapingo.mx

Abstract: This study analyzes and compares three Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) prediction models at different time scales: (1) Kalman Filter with Exogenous Variables (DKF-ARX-Pt, FK), (2) Closed Recurrent Units (GRU) and (3) Autoregressive Neural Networks with External Input (NARX). The evaluation was performed on observed data from meteorological stations in the Texcoco region, Mexico, considering several performance metrics, such as mean absolute error (MAE), mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and Kling-Gupta efficiency (KGE). The results indicate that the FK model with exogenous variables is the most accurate model for SPEI prediction at different time scales, standing out in terms of stability and low variance in prediction error. GRU networks showed acceptable performance on long scales (SPEI12 and SPEI24), but with lower stability on short scales. In contrast, NARX networks presented the worst performance, with high errors and negative efficiency coefficients at several scales. It is concluded that models based on Kalman filters can be key tools to improve drought mitigation strategies in vulnerable regions.

Key words: Drought indices, autoregressive models, Kalman filter, SPEI.

1. Introducción

La escasez de agua en la cuenca del Valle de México se ha agravado en las últimas décadas debido al crecimiento poblacional, el uso ineficiente de los recursos y la infraestructura deteriorada. Además, los efectos del cambio climático han modificado los regímenes de lluvia y provocado sequías más frecuentes y severas [1]. Esta problemática se ve intensificada por la falta de redes de monitoreo adecuadas, sistemas de alerta temprana y planes de contingencia eficaces frente a eventos de sequía.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) genera información meteorológica y climatológica mediante redes de observación que incluyen estaciones meteorológicas, radares y satélites. A través del Monitor de Sequía en México (MSM) [2], el SMN evalúa la evolución de la sequía a nivel nacional y regional [3]. Tradicionalmente, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) ha sido utilizado para evaluar la severidad de la sequía, aunque su principal limitación es que solo considera datos de precipitación, sin tomar en cuenta la evapotranspiración, un factor clave en la dinámica hídrica. Para abordar esta limitación, el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) ha sido adoptado, ya que incorpora la evapotranspiración y proporciona una evaluación más precisa de la severidad de la sequía [4].

En la búsqueda de metodologías más precisas para la predicción de sequías, se han desarrollado modelos avanzados como las Redes Neuronales Artificiales (RNA), los Filtros de Kalman y sus variantes con variables exógenas. Estos enfoques no solo permiten estimar las condiciones actuales, sino que también posibilitan la predicción del comportamiento de las sequías mediante series temporales. Los modelos basados en el Filtro de Kalman con variables exógenas (DKF-ARX-Pt) han demostrado ser eficaces al integrar información climática adicional, como precipitaciones y temperaturas, mejorando la precisión del pronóstico [5]. De manera similar, las Redes Neuronales Recurrentes como las GRU y los modelos NARX han mostrado su capacidad para identificar patrones no lineales en series temporales, lo que resulta fundamental en el modelado de eventos climáticos extremos [6, 7].

Este estudio compara la efectividad de tres modelos avanzados DKF-ARX-Pt, GRU y NARX para la predicción del SPEI en distintas escalas temporales en el municipio de Texcoco, Estado de México. Se busca identificar el modelo con mejor desempeño en términos de precisión, estabilidad y capacidad de generalización, con el objetivo de mejorar las estrategias de gestión hídrica y mitigación de sequías en la región.

2. Materiales and Métodos

2.1 Descripción de la zona de estudio

Las estaciones meteorológicas analizadas se encuentran en el oriente del Estado de México, dentro de los límites de los municipios de Texcoco y sus municipios vecinos como Atenco, Chimalhuacán y Tepetlaoxtoc. Texcoco se encuentra a 32 km de la Ciudad de México.

Sus coordenadas geográficas son 19,30° N, 98,53° O. Colinda al norte con los municipios de Tepetlaoxtoc, Papalotla, Chiautla, y Chiconcuac; al sur con

Chimalhuacán, e Ixtapaluca; al oeste con Atenco; y Nezahualcóyotl; y al este con los estados de Tlaxcala y Puebla. Oficialmente el municipio de Texcoco tiene una extensión territorial de 418,69 kilómetros cuadrados. La altitud de la cabecera municipal se encuentra entre los 2.250 y los 2.750 msnm, su clima se considera templado semiseco, con una temperatura media anual de 15,9 °C y una precipitación media anual de 686 mm.

En los últimos años tuvo un crecimiento urbano reflejado en el desarrollo de nuevos asentamientos poblacionales y desarrollos de obra civil, de acuerdo con el último censo de población realizado por el INEGI, se cuenta con 277.562 habitantes cuya densidad poblacional es de 662,93 habitantes por kilómetro cuadrado [8].

2.2 Datos climatológicos

El análisis se realizó con base en la red de 12 estaciones operadas por el SMN (Tabla 1), a efecto de este estudio se utilizó el periodo de enero de 1981 a diciembre de 2023 (42 años). Estas estaciones fueron consideradas por su distribución espacial y en otras por su continuidad de los registros pluviométricos (Figura 1).

Para la evaluación de los modelos, se utilizaron datos de precipitación y temperatura provenientes de estaciones meteorológicas en la región de Texcoco, México. Estos datos fueron complementados con información satelital de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) y DAYMET (Daily Surface Weather Data), bases de datos que ofrecen series temporales de alta resolución espacial y temporal.

Tabla 1. Estaciones operadas por el SMN en la zona de estudio y situación actual.

Clave	Nombre	Municipio	Estado	Situación	Latitud	Longitud	Altitud
13035	Tezontepec	Tezontepec de Aldama	México	Suspendida	19,42	-98,82	2000
15017	Coatepec de los olivos	Ixtapaluca	México	Operando	19,39	-98,85	2405
15023	Chimalhuacán	Chimalhuacán	México	Suspendida	19,42	-98,93	2282
15044	La Grande	Atenco	México	Operando	19,55	-98,88	2250
15082	Rio Frio	Ixtapaluca	México	Suspendida	19,35	-98,67	2977
15101	San Miguel Tlaixpán	Texcoco	México	Operando	19,52	-98,82	2405
15123	Tepetlaoxtoc	Tepetlaoxtoc	México	Suspendida	19,59	-98,82	2324
15138	Atenco (CFE)	Atenco	México	Suspendida	19,55	-98,92	2245
15145	Plan lago de Texcoco	Chimalhuacán	México	Operando	19,45	-99,00	2260
15163	Texcoco (SMN)	Texcoco	México	Suspendida	19,51	-98,88	2250
15167	El Tejocote	Texcoco	México	Operando	19,44	-98,90	2256
15170	Chapingo (DGE)	Texcoco	México	Operando	19,50	-98,88	2250

En promedio se tiene un 48% de datos disponibles en la zona de estudio; por tal razón se optó por considerar los datos de tipo pentada (cinco días) de la base de datos CHIRPS. Para el caso de la temperatura máxima y mínima se obtuvieron de la

base DAYMET que proporciona datos diarios y mensuales. Al analizar los datos mensuales de CHIRPS y DAYMET en una estación representativa del sitio, se obtuvo que para la estación 15170 de Chapingo los datos observados y los obtenidos de la base de datos CHIRPS fueron de un R^2 = 0,8921 para la precipitación, y para DAYMET se obtuvo un R^2 = 0,9974 para la temperatura máxima y R^2 = 0,9824 para la temperatura mínima [9].

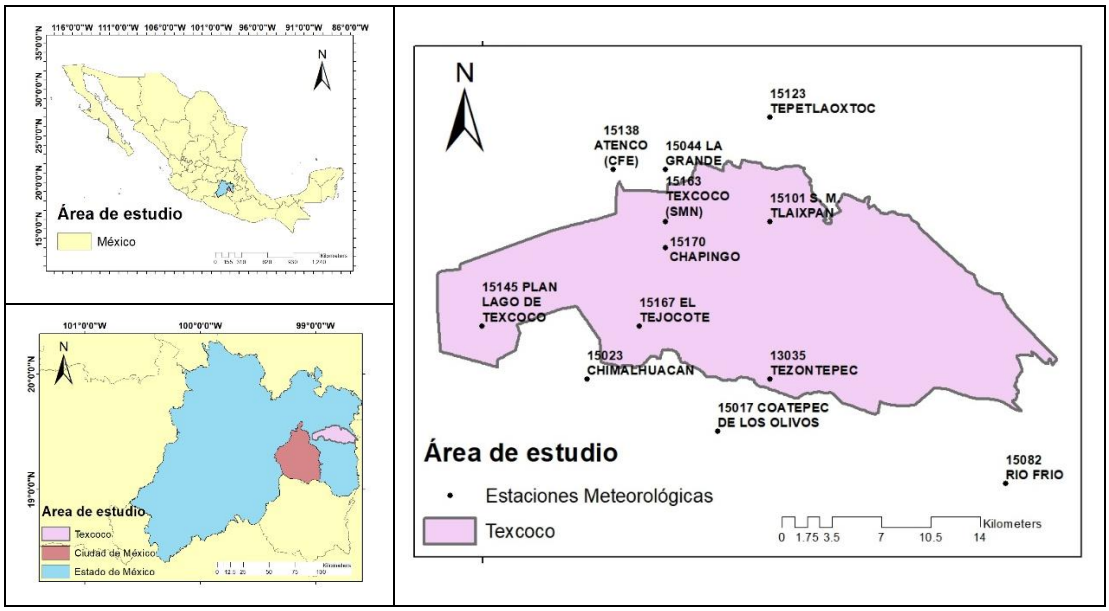


Figura 1. Ubicación del Municipio de Texcoco y las 12 estaciones meteorológicas operadas por el SMN.

2.3 Información satelital CHIRPS

El algoritmo CHIRPS combina tres fuentes de datos: (a) la climatología de precipitaciones CHPclim, una climatología global de 0.05° basada en datos de estaciones, observaciones satelitales, elevación y coordenadas [10]; (b) estimaciones satelitales de precipitación térmica infrarroja (IRP); y (c) mediciones de pluviómetros *in situ*. CHPclim se diferencia por utilizar promedios satelitales a largo plazo para mejorar su precisión, especialmente en regiones montañosas [11]. La combinación de CHIRP con datos de estaciones usa la correlación estimada entre la precipitación de un píxel y estaciones cercanas [12].

La fusión de datos se realiza en escalas de 5 días (pentadas) y mensuales, ajustando las pentadas para que su suma coincida con el total mensual. Se genera una versión diaria a partir de estos datos. CHIRPS preliminar se publica 2 días después de una pentada, y la versión final en la tercera semana del mes siguiente.

2.4 Información satelital DAYMET

El Daily Surface Weather Data ofrece estimaciones continuas y cuadriculadas de variables meteorológicas diarias mediante interpolación y modelización estadística. Incluye temperatura mínima y máxima, precipitación, presión de vapor, radiación de onda corta, equivalente en agua de nieve y duración del día, en una cuadrícula de 1 km² para América del Norte y Hawái desde 1980, y Puerto Rico desde 1950.

El método Daymet estima parámetros meteorológicos en sitios sin instrumentación mediante interpolación y extrapolación, usando datos ponderados de estaciones cercanas. En la versión Daymet V4, se optimiza la selección de estaciones eliminando el cálculo iterativo de densidad, definiendo en su lugar un radio de búsqueda fijo basado en distancias precomputadas. Dos flujos de trabajo generan las variables: uno para temperatura diaria y otro para precipitación [13].

2.5 Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

El Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) es una extensión del SPI que incorpora tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial (PET) para evaluar la sequía, considerando el impacto del aumento de temperatura en la demanda de agua.

El SPEI se calcula mediante el balance hídrico (Di = P – ETo) en distintas escalas temporales (1, 3, 6, 12 y 24 meses). A diferencia del SPI, que solo usa la precipitación, el SPEI proporciona una medición más precisa de la severidad de la sequía al incluir la demanda evaporativa atmosférica.

Inicialmente, se propuso la ecuación de Thornthwaite [14] para estimar la evapotranspiración debido a su simplicidad, pero métodos más precisos como la ecuación de FAO-56 Penman-Monteith [15] son preferibles si hay datos suficientes. En su defecto, se recomienda la ecuación de Hargreaves, que fue utilizada en este estudio.

El cálculo del SPEI se realizó en RStudio® con la paquetería SPEI.R versión 1.8.1 [16], empleando datos de precipitación, temperatura mínima y máxima, y latitud del sitio de estudio. Los valores obtenidos fueron analizados según la clasificación de McKee, Doesken & Kleist [17] (Tabla 2) para identificar la evolución de sequías, su intensidad, duración y fechas de inicio y término.

Tabla 2. Categorías y clasificación del SPEI [17].

Valor del índice	Categoría
> 2.00	Extremadamente húmedo
1,50 a 1,99	Muy húmedo
1,00 a 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Cercano a lo normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco

-1,50 a -1,99	Muy seco
< -2,00	Extremadamente seco

2.6 Pronóstico de sequías

Anticiparse a las características de una sequía (magnitud, duración y distribución) es clave para mitigar sus efectos [4]. Un pronóstico preciso mejora la gestión de recursos hídricos y se basa en indicadores climáticos como la precipitación o en índices especializados como SPI y SPEI.

Mishra & Singh [18] analizan diversas metodologías de predicción de sequías, incluyendo regresión, series de tiempo, modelos probabilísticos, redes neuronales artificiales (RNA), enfoques híbridos y minería de datos. En los últimos años, las RNA han destacado por su capacidad de aprendizaje automático [19], aplicándose en hidrología para modelar lluvia-escorrentía, caudales, aguas subterráneas y calidad del agua [20]. Su ventaja principal es identificar patrones no lineales sin necesidad de modelos matemáticos predefinidos [21].

La combinación de redes neuronales y filtros de Kalman ha sido estudiada en la predicción de sequías y el cálculo del SPEI. Se han aplicado modelos como DKF-ARX-Pt (Filtro de Kalman con variables exógenas como precipitación y temperatura), GRU (Unidad Recurrente Cerrada) y NARX (Redes Neuronales Autorregresivas con Entrada Externa).

2.7 Filtro de Kalman con Variables Exógenas (DKF-ARX-Pt)

El Filtro de Kalman con Variables Exógenas, conocido como DKF-ARX-Pt, es una extensión del Filtro de Kalman clásico, utilizado para estimar el estado de sistemas dinámicos bajo incertidumbre, pero incorporando variables externas o exógenas que influencian el proceso. Tradicionalmente, el Filtro de Kalman se utiliza en sistemas lineales donde se conoce un modelo del sistema y se busca estimar el estado del mismo a medida que se reciben observaciones ruidosas. Sin embargo, en fenómenos complejos como la sequía, los modelos de predicción deben considerar no solo las observaciones pasadas del mismo sistema (como los índices de sequía), sino también factores externos que afectan su evolución, como la precipitación y la temperatura [4].

El modelo ARX (AutoRegresivo con Entrada Exógena) es fundamental en la formulación del DKF-ARX-Pt, ya que amplía el modelo clásico de series temporales autorregresivas para incluir entradas de variables externas. Este modelo toma la forma:

Donde:

- y(t) es la variable dependiente (por ejemplo, el índice de sequía como SPEI),
- u(t) es la entrada exógena (como precipitación o temperatura),
- a_i y b_j son los coeficientes autoregresivos y exógenos, respectivamente,
- e(t) es el error del modelo.

En el contexto del Filtro de Kalman, el DKF-ARX-Pt incorpora estas entradas externas dentro del marco de estimación del estado, permitiendo que el modelo se ajuste no solo en función de las observaciones del sistema, sino también a las influencias de las variables climáticas externas.

2.8 Unidades Recurrentes Cerradas (GRU)

Las Unidades Recurrentes Cerradas (GRU, por sus siglas en inglés, Gated Recurrent Units) son un tipo de red neuronal recurrente (RNN) altamente efectiva en la modelización de series temporales, incluida la predicción de variables climáticas como la sequía. Introducidas por Cho et al. [22], las GRU han sido utilizadas para problemas en los que la dependencia a largo plazo y la propagación de gradientes son críticos, como el análisis de datos meteorológicos y la predicción de fenómenos climáticos.

Su principal ventaja sobre las RNN tradicionales radica en su capacidad para mitigar el problema del desvanecimiento del gradiente, permitiendo capturar relaciones a largo plazo en los datos temporales. Esto es particularmente relevante en la predicción de sequías, donde las condiciones actuales pueden estar influenciadas por eventos climáticos ocurridos meses o incluso años atrás [23].

2.9 Redes Neuronales Autorregresivas con Entrada Externa (NARX)

Las Redes Neuronales Autorregresivas con Entrada Externa (NARX) han demostrado ser una técnica efectiva para modelar sistemas dinámicos no lineales, incluyendo la predicción de sequías. Propuestas por Lin et al. [24], las NARX extienden los modelos autorregresivos clásicos al capturar relaciones no lineales entre variables climáticas, diferenciándose de enfoques tradicionales como ARIMA o ARX. En la predicción del SPEI, pueden integrar variables exógenas como precipitación y temperatura para mejorar la precisión. Hernández-Vásquez et al. [25] aplicaron redes neuronales artificiales en la cuenca del río Sonora, obteniendo un R^2 promedio de 0.76 en validación, evidenciando su capacidad predictiva.

2.10 Métricas de Evaluación de Modelos de Predicción

En la evaluación de modelos de predicción de series temporales y clima, es fundamental utilizar métricas que permitan medir el desempeño en términos de

error y capacidad de ajuste. A continuación, se describen las métricas utilizadas en la comparación de los modelos de predicción de SPEI.

Los MAE (Error Absoluto Medio), MSE (Error Cuadrático Medio) y RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio) son métricas que miden el error absoluto y cuadrático, con RMSE penalizando más los errores grandes. R^2 (Coeficiente de Determinación) y NSE (Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe) evalúan la capacidad del modelo para explicar la variabilidad de los datos, con NSE más utilizado en modelos hidrológicos. KGE (Kling-Gupta Efficiency) ofrece una evaluación más completa del modelo, considerando correlación, sesgo y variabilidad, siendo más útil en estudios climáticos e hidrológicos.

Este conjunto de métricas proporciona una visión integral del desempeño de los modelos, permitiendo seleccionar el más adecuado para la predicción del SPEI.

3. Resultados

El cálculo y pronóstico del Índice de Precipitación Estandarizado Evaporativo (SPEI) es crucial para entender la dinámica de las sequías y su impacto en los recursos hídricos. En este contexto, los modelos utilizados para la predicción deben ser altamente precisos y robustos. Se realizó un análisis de los tres modelos (Filtro de Kalman con Variables Exógenas (DKF-ARX-Pt, FK)), Unidades Recurrentes Cerradas (GRU) y Redes Neuronales Autorregresivas con Entrada Externa (NARX), comparando la predicción de los tres modelos con los datos analizados de SPEI para las distintas escalas de tiempo.

Tabla 3. Valores métricos de los tres modelos para la estación 15170 Chapingo, Texcoco.

Modelo	MAE	MSE	RMSE	R^2	NSE	KGE
SPEI1_FK	0,422	0,279	0,528	0,716	0,716	0,353
SPEI1_GRU	0,242	0,094	0,307	0,125	0,125	0,063
SPEI1_NARX	0,254	0,101	0,317	0,065	0,065	-0,095
SPEI3_FK	0,103	0,018	0,133	0,982	0,982	0,946
SPEI3_GRU	0,198	0,065	0,255	0,605	0,605	-1,406
SPEI3_NARX	0,173	0,049	0,221	0,703	0,703	0,145
SPEI6_FK	0,070	0,008	0,092	0,991	0,991	0,973
SPEI6_GRU	0,147	0,035	0,186	0,790	0,790	0,477
SPEI6_NARX	0,147	0,034	0,186	0,792	0,792	0,492
SPEI9_FK	0,054	0,005	0,074	0,994	0,994	0,983
SPEI9_GRU	0,138	0,032	0,178	0,828	0,828	-1,029
SPEI9_NARX	0,139	0,033	0,181	0,824	0,824	-1,888
SPEI12_FK	0,045	0,004	0,065	0,996	0,996	0,987
SPEI12_GRU	0,104	0,017	0,132	0,896	0,896	-0,042
SPEI12_NARX	0,106	0,019	0,139	0,885	0,885	-0,706
SPEI24_FK	0,035	0,003	0,052	0,997	0,997	0,992
SPEI24_GRU	0,106	0,020	0,140	0,919	0,919	0,714

SPEI24_NARX	0,107	0,018	0,136	0,924	0,924	-2,228

De acuerdo con la Tabla 3, el modelo FK (DKF-ARX-Pt) presenta el mejor desempeño general, con los valores más bajos de MAE, MSE y RMSE, y los más altos de R^2, NSE y KGE en todas las escalas de SPEI. En SPEI 6, SPEI 9, SPEI 12 y SPEI 24, $R^2 > 0,99$, indicando un ajuste casi perfecto. Su bajo MAE y alto KGE reflejan precisión y correlación con los datos reales, gracias a la capacidad del Filtro de Kalman para suavizar fluctuaciones y mejorar la estabilidad del modelo.

Las redes GRU muestran un rendimiento aceptable, aunque inferior a FK en escalas cortas (SPEI1, SPEI 3 y SPEI 6) con $R^2 < 0,8$ y valores negativos de KGE en algunos casos (SPEI 3, SPEI 9, SPEI 12). Sin embargo, su desempeño mejora en escalas largas (SPEI 12 y SPEI 24, con R^2 de 0,896 y 0,919), lo que sugiere que son más eficaces en la captura de dependencias a largo plazo.

Las redes NARX tienen el peor desempeño, con mayores errores (MAE y RMSE superiores) y KGE negativo en SPEI 1, SPEI 9, SPEI 12 y SPEI 24, lo que indica dificultades en la representación de la variabilidad. Aunque en SPEI 6 y SPEI 9 $R^2 \approx 0,79 – 0,82$, sigue siendo inferior a FK, lo que sugiere limitaciones en la captura de dinámicas de sequía en ciertas escalas.

El análisis comparó los modelos en SPEI 1, SPEI 3, SPEI 6, SPEI 9, SPEI 12 y SPEI 24, con pronósticos a 3 y 6 meses, evaluados mediante MAE, MSE, RMSE, R^2, NSE y KGE. Para seleccionar el mejor modelo por estación, se usó NSE, una métrica clave en modelado hidrológico y climático:

- NSE = 1 → Predicción perfecta.
- NSE > 0,75 → Modelo muy bueno.
- NSE ≈ 0 → Modelo no mejor que la media observada.
- NSE < 0 → Modelo peor que usar la media de los datos.

Tabla 4. Análisis de los tres modelos para las estaciones meteorológicas a un pronóstico de 3 meses.

Estación	SPEI Escala	Modelo	RMSE	NSE
13035	24	FK	0,050	0,997
15017	24	FK	0,052	0,997
15023	24	FK	0,051	0,997
15044	24	FK	0,044	0,998
15082	24	FK	0,049	0,998
15101	24	FK	0,050	0,997
15123	12	FK	0,063	0,996
15138	24	FK	0,044	0,998
15145	24	FK	0,050	0,997
15163	24	FK	0,048	0,998

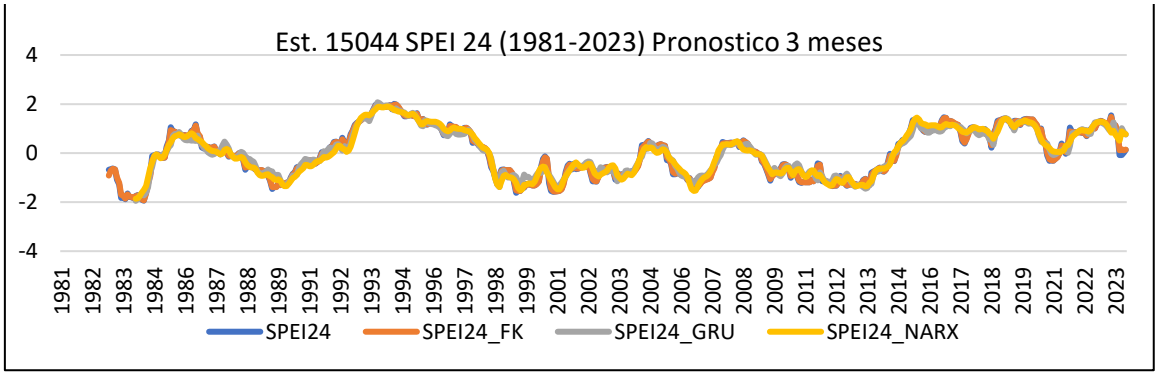
15167	24	FK	0,051	0,997
15170	24	FK	0,054	0,997

Los resultados de la Tabla 4, muestran que el modelo FK superó en precisión a los modelos GRU y NARX en la mayoría de las estaciones analizadas, excepto en la estación 15123, donde SPEI 12 fue el mejor. En la escala de 3 meses, el modelo FK con SPEI24 obtuvo los valores más altos de NSE en la mayoría de las estaciones, con valores superiores a 0,99, indicando una excelente capacidad predictiva.

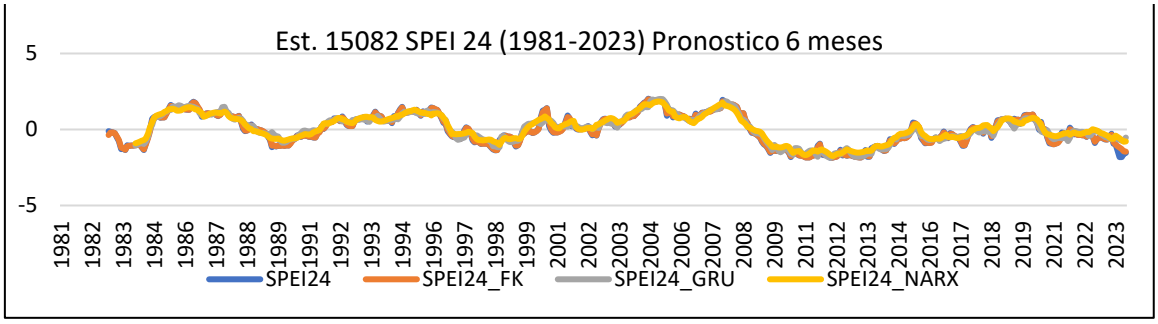
Tabla 5. Análisis de los tres modelos para las estaciones meteorológicas a un pronóstico de 6 meses

Estación	SPEI Escala	Modelo	RMSE	NSE
13035	12	FK	0,083	0,993
15017	12	FK	0,129	0,983
15023	12	FK	0,113	0,987
15044	24	FK	0,118	0,986
15082	24	FK	0,061	0,996
15101	9	FK	0,092	0,991
15123	24	FK	0,150	0,977
15138	9	FK	0,116	0,986
15145	12	FK	0,128	0,983
15163	12	FK	0,093	0,991
15167	12	FK	0,088	0,992
15170	12	FK	0,115	0,986

En la escala de 6 meses (Tabla 5), el modelo FK también obtuvo los mejores desempeños, aunque la escala de SPEI varía entre 12, 24 y 9 meses según la estación analizada. Esto sugiere que las escalas más largas de SPEI pueden proporcionar predicciones más estables y precisas.



(a)



(**b**)

Figura 2. Variación temporal de los tres modelos y valores calculados de SPEI en escala de 24 meses: (a) Estación 15044 con pronóstico de 3 meses para los tres modelos a una escala de SPEI 24; (b) Estación 15082 con pronóstico de 6 meses para los tres modelos a una escala de SPEI 24.

Al analizar ambas gráficas (Figura 2) que muestran la predicción del SPEI 24 para dos estaciones diferentes (15044 y 15082), se pueden observar en ambas gráficas, que el Filtro de Kalman (FK), las GRU y NARX siguen de cerca la serie observada (SPEI 24), lo que indica que los modelos están capturando bien las tendencias y patrones a lo largo del tiempo, sin embargo, el FK (línea roja) muestra una mayor estabilidad y suavidad en comparación con GRU (línea verde) y NARX (línea morada), lo que sugiere una menor varianza y, probablemente, un error más bajo.

En la primera gráfica (Pronóstico a 3 meses), se observa que FK y NARX logran capturar mejor los picos y valles extremos, mientras que GRU muestra una ligera subestimación en algunas regiones. En la segunda gráfica (Pronóstico a 6 meses), FK sigue mostrando una mejor capacidad para capturar las fluctuaciones del SPEI24, mientras que NARX y GRU presentan ligeras desviaciones en algunas fases.

En ambos casos, FK logra mantener una mejor alineación con la serie original, lo que indica que es más robusto en la predicción a largo plazo. GRU parece funcionar mejor en periodos más estables, pero su desempeño disminuye en eventos extremos de sequía o exceso de humedad.

El Filtro de Kalman (FK) es el modelo más consistente y preciso en ambas escalas temporales, lo que coincide con los resultados previos de que este modelo alcanza un R^2 superior a 0,99 y errores más bajos (MAE, RMSE).

Las GRU pueden ser útiles, pero presentan limitaciones en la captura de eventos extremos, el modelo NARX muestra un desempeño intermedio, pero es menos confiable en algunas fases. Esto respalda la selección del FK como el mejor modelo para la predicción del SPEI en diferentes escalas temporales.

4. Discusión

Los resultados coinciden con estudios previos que han identificado una tendencia al aumento de la temperatura en la región central de México y su impacto en la

disponibilidad hídrica [26]. La aplicación de filtros de Kalman y modelos autorregresivos mejoró la capacidad de pronóstico en comparación con métodos tradicionales. La identificación de patrones cíclicos en los valores de SPEI es crucial para desarrollar estrategias de mitigación de sequías a mediano y largo plazo.

Para lograr la mayor precisión posible, DKF-ARX-Pt es el modelo ideal. Su desempeño es notablemente superior en todas las escalas de SPEI, con errores bajos y ajustes cercanos al 100%, una alternativa basada en redes neuronales, GRU muestra mejores resultados que NARX, especialmente en escalas largas (SPEI 12 y SPEI 24). Sin embargo, sigue estando por debajo del rendimiento de DKF-ARX-Pt. El modelo NARX no es recomendable en este caso, ya que tiene errores más elevados y coeficientes de eficiencia negativos en varias escalas, lo que sugiere problemas en la generalización de datos.

El Filtro de Kalman con Variables Exógenas (DKF-ARX-Pt) cumple mejor con el objetivo del estudio, ya que proporciona predicciones más precisas y estables para SPEI en todas las escalas. Su capacidad de ajustar dinámicamente las predicciones en función de la incertidumbre lo hace ideal para este tipo de análisis en sistemas hidrológicos. El desempeño superior del modelo FK puede atribuirse a su capacidad para manejar la incertidumbre y actualizar las estimaciones de manera secuencial, lo que lo hace particularmente útil en series temporales climáticas. Por otro lado, los modelos basados en redes neuronales (GRU y NARX) presentaron un menor desempeño en términos de NSE, posiblemente debido a la sensibilidad de estos modelos a la cantidad de datos y su capacidad de generalización en diferentes escalas temporales. Además, la mejor performance del FK en escalas más largas de SPEI podría indicar que los procesos climáticos de largo plazo son mejor capturados con enfoques secuenciales como el filtro de Kalman.

5. Conclusiones

El Filtro de Kalman con Variables Exógenas (DKF-ARX-Pt) es el mejor modelo para la predicción de SPEI debido a su alto grado de ajuste ($R^2 > 0,99$ en varias escalas), su bajo error (MAE, RMSE) y su buen desempeño general en la reconstrucción de las series de SPEI. Las GRU pueden ser una alternativa aceptable, especialmente en escalas largas (SPEI12 y SPEI24), pero su rendimiento es inferior a DKF-ARX-Pt. El modelo NARX no es recomendable, ya que tiene errores más altos y valores negativos en el coeficiente KGE en varias escalas.

Este análisis confirma que los modelos basados en Filtros de Kalman pueden ser altamente efectivos para la predicción de sequías y pueden utilizarse para mejorar las estrategias de mitigación y adaptación ante estos fenómenos climáticos.

Los resultados de este estudio indican que el Filtro de Kalman con Variables Exógenas (FK) es el modelo más efectivo para la predicción de SPEI en las escalas temporales analizadas. La utilización de escalas de tiempo más largas, como SPEI 24 y SPEI 12, parece mejorar la precisión de las predicciones, lo que podría tener implicaciones importantes para la gestión del agua y la planificación de sequías en el futuro.

Se recomienda la exploración de modelos híbridos en futuros estudios para mejorar la precisión en escalas cortas y abordar los efectos del cambio climático en la predicción de sequías.

Author Contributions: Conceptualization, M.C.-C. and L.I.-C.; methodology, M.C.-C.; software, M.C.-C.; validation, L.I.-C., R.A.-R. and G.A.-G.; formal analysis, M.C.-C.; investigation, M.C.-C.; resources, M.C.-C.; data curation, R.A.-R.; writing—original draft preparation, M.C.-C.; writing—review and editing, L.I.-C.; visualization, L.I.-C.; supervision, L.I.-C.; project administration, L.I.-C.; funding acquisition, M.C.-C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the National Council of Humanities, Science and Technology, CONAHCYT, of Mexico, grant number 320262.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.
Data Availability Statement: Climate Engine (http://ClimateEngine.org)

Acknowledgments: To the National Council of Humanities, Science and Technology, CONAHCYT, of Mexico for the financial support provided in the form of a postgraduate maintenance scholarship for the development of this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Referencias

1. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Ríos Fuerte y Sinaloa, Ciudad de México, México.
2. Servicio Meteorológico Nacional (2023). Monitor de Sequía en México. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx.
3. SMN (2022). Red de Estaciones Climatológicas. Climatología diaria. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de http://smn.cna.gob.mx/index.
4. Castillo-Castillo, M.,Ibáñez-Castillo, L.,Valdés, J.B., Arteaga-Ramirez, R. 2017. Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. Tecnología y Ciencias del Agua: 8(1) 35-52.
5. Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Basic Engineering, 82(1), 35-45.
6. Zhang, L., Ren, D., Yang, X., & Zhang, P. (2016). Application of deep learning in climate prediction: A review. Advances in Meteorology, 2016, 1-11.
7. Dastorani, M. T., & Afkhami, H. (2011). Application of artificial neural networks for regional drought prediction using meteorological drought indices. Water Resources Management, 25(2), 407-426.
8. INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2023. 2020 Censo de Población y Vivienda. México. https://www.inegi.org.mx/datosabiertos/.

9. Carrillo-Carrillo, M.; Ibáñez-Castillo, L.; Arteaga-Ramírez, R.; Arévalo-Galarza, G. Spatio-Temporal Analysis of Drought with SPEI in the State of Mexico and Mexico City. Atmosphere 2025, 16, 202. https://doi.org/10.3390/atmos16020202
10. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D. 2015. The climate hazards group infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, 150066.
11. Funk, C., Verdin, J., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D. and Husak, G. 2015b. A global satellite assisted precipitation climatology. Earth System Science Data Discussions, 7, 1–13. https://doi.org/10.5194/essdd-7-1-2015
12. Maidment, R., Grimes, D., Black, E. et al. A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. Sci Data 4, 170063 2017. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63
13. Thornton, M.M., R. Shrestha, Y. Wei, P.E. Thornton, S-C. Kao, and B.E. Wilson. 2022. Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4 R1. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2129
14. Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38, 55-94.
15. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food And Agriculture Organization (FAO), Rome.
16. Beguería, S., & Vicente, S. 2014. Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Package SPEI.R for R or RStudio Program. https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html. (Recuperado: mayo 2023).
17. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales (pp. 179-184). Eight Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, American Meteorological Society
18. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling - A review. Journal of Hydrology, 403(1–2), 157–175. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049
19. Tkacz, G., & Hu, S. (1999). Forecasting GDP growth using artificial neural networks. Bank of Canada.
20. ASCE. (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. Journal of Hydrologic Engineering, 5(2), 115–123.
21. Dastorani, M. T., & Afkhami, H. (2011). Application of artificial neural networks on drought prediction in Yazd (Iran). Desert, 16, 39–48.
22. Cho, K., Van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., & Bengio, Y. (2014). Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. arXiv preprint arXiv:1406.1078.
23. Zaytar, M. A., & Amrani, C. E. (2016). Sequence to sequence weather forecasting with long short-term memory recurrent neural networks. International Journal of Computer Applications, 143(11), 7-11.
24. Lin, T., Horne, B. G., Tino, P., & Giles, C. L. (1996). Learning long-term dependencies in NARX recurrent neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks, 7(6), 1329-1338.
25. Hernández-Vásquez, R., & Ibáñez-Castillo, C. (2021). Aplicación de redes neuronales para la predicción de sequías en la cuenca del río Sonora. Revista de Hidrometeorología Aplicada, 12(3), 45-58.
26. Magaña, V., Pérez, J. L., & Méndez, M. (2012). Diagnóstico y escenarios de cambio climático en México. Boletín de la Sociedad Mexicana de Meteorología, 1(1), 30-49.

PARTE 5

MECANIZAÇÃO E TELEMETRIA

MECANIZACIÓN Y TELEMETRÍA

Índice

Preliminary assessment of an electrostatic sprayer prototype with pneumatic nozzles for enhanced pesticide application 313

La definición de equipo intercambiable aplicada a la maquinaria agrícola 326

Adecuación de las normas armonizadas de maquinaria agrícola a los nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad del Reglamento (UE) 2023/1230 333

Estudo comparativo da eficiência energética em operações mecanizadas na instalação de culturas anuais 348

Proposta de desenvolvimento de um microcontrolador de baixo custo para atualização de sistemas de comando de distribuidores de adubo de taxa variável: Estudo de caso 366

Review on damage susceptibility of fresh horticultural products during mechanical and robotic harvesting 376

Preliminary results on a Predictive Risk Model for Occupational Safety in Natural Cork Exploitation: A Case Study in Sierra de Espadán 383

Desempeño de los modelos de RT-DETR y YOLOv9 en la identificación de malezas en maíz 389

Selección y caracterización de un material inerte para los ensayos de inspección en aplicadores de gránulo 404

Efeitos da colheita manual e mecanizada na composição de vinhos merlot no sul do Brasil. 415

Spatial Analysis of Land Use and Occupation and Agricultural Mechanization Suitability in Alentejo (Portugal) between 2007 and 2018 426

Historical Dynamics of Soil Carbon Stocks Using Remote Sensing and Modeling in Rio de Janeiro, Brazil 441

Desenvolvimento de uma máquina lavadora de rizomas 455

Implementación de un sistema on-the-go para el monitoreo de humedad en suelo desde una plataforma de fenotipado terrestre 469

Impacto do Míldio na geometria e desenvolvimento da Videira: Monitorização com VANT 478

CÁLCULO DE SPEI USANDO LAS BASES DE DATOS CHIRPS Y DAYMET EN EL ESTADO DE MÉXICO 492

Máquina lavadora de rizomas: difusão tecnológica 506

Avaliação do desempenho de espalhadores de estrume na aplicação localizada de composto em olival 515

Preliminary assessment of an electrostatic sprayer prototype with pneumatic nozzles for enhanced pesticide application

Alba Vigo-Morancho[1*], María Videgain[1,2], Mariano Vidal[1], Sergio Artero[1], Ángel Jiménez[1], Hugo Malón[1], F. Javier García-Ramos[1,2]

1 Escuela Politécnica Superior, Universidad de Zaragoza, Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca, España

2 Instituto Agroalimentario de Aragón – IA2 (CITA), EPS, Universidad de Zaragoza, Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca, España

* Correspondence: albavm@unizar.es

Abstract: This study presents a preliminary laboratory evaluation of a pneumatic electrostatic sprayer prototype designed for 3D crops. Two configurations—electrostatic system connected (ES) and disconnected (NES)—were tested. Airflow mapping, vertical distribution profiles, charge-to-mass ratio (CMR), and deposition analyses were conducted. Results showed that electrostatic activation significantly increased both coverage and deposition, particularly on unexposed target surfaces. These findings suggest that electrostatic spraying can enhance pesticide application efficiency and warrant further field validation.

Keywords: Crop protection, charged droplets, coverage, deposition.

1. Introducción

La aplicación de productos fitosanitarios es una de las actividades del ámbito agrícola que ha experimentado un mayor desarrollo tecnológico a lo largo de los años. Desde hace décadas, se investiga cómo mejorar este proceso abordando los distintos factores involucrados, con el objetivo de optimizarlo tanto en el plano técnico como conceptual. Esta práctica, además de ser esencial para garantizar la sanidad y protección de los cultivos y, por tanto, asegurar la producción de alimentos, representa también uno de los principales costes de producción. A ello se suma el impacto ambiental derivado del uso de productos químicos y el endurecimiento progresivo de las normativas, orientadas a su reducción. Todo esto ha impulsado la incorporación continua de nuevas tecnologías en el sector, con el objetivo de aumentar la eficiencia en la aplicación y, en consecuencia, disminuir el uso de fitosanitarios en la agricultura.

La aplicación de tecnología electrostática en equipos de pulverización se desarrolló a finales del siglo XX. Esta tecnología se rige según la ley de Coulomb [1] y que se

basa en la generación de una carga positiva o negativa sobre las gotas al pasar por un campo eléctrico generado en el entorno de salida del líquido. De esta manera, se genera un efecto de atracción electrostática entre gota y cultivo que permite incrementar la deposición de producto y, a su vez, alcanzar zonas del mismo a las que no llegaría en condiciones no electrostáticas [2].

Inicialmente, se evaluó su efectividad mediante el análisis del método de aplicación de dicha carga a la gota pulverizada, principalmente mediante conducción o inducción, siendo la segunda la que ha resultado ser más eficiente para su aplicación en pulverizadores agrícolas. Por un lado, en términos de seguridad del operador, puesto que el proceso no implica contacto directo con el fluido y el campo eléctrico se mantiene por debajo de la resistencia a la rotura del aire, lo que permite además un voltaje de funcionamiento más bajo y facilita el aislamiento del electrodo [3]. Por otro lado, en términos de eficiencia energética, ya que el consumo de energía ha resultado ser considerablemente menor en comparación con otros métodos de carga [4].

Aunque la integración de tecnología electrostática ha demostrado un incremento en la deposición del producto, diversos estudios han señalado que la penetración en zonas interiores del cultivo sigue siendo limitada. Esta limitación se ha abordado mediante la incorporación de sistemas de asistencia de aire, evaluados inicialmente en equipos de mano o en configuraciones de laboratorio con un único dispositivo de salida [3, 5, 6].

En el contexto actual de aplicación de fitosanitarios en cultivos tridimensionales, especialmente en los denominados en los últimos años como “cultivos especiales”, se han experimentado avances significativos en el diseño de los equipos de aplicación, que actualmente suelen incorporar un sistema de generación de aire mediante distintos mecanismos, según su configuración. Esto permite clasificarlos como equipos neumáticos, cuando la formación de la gota se produce por el impacto del flujo de aire a presión sobre el líquido; o como equipos hidroneumáticos, cuando una corriente de aire generada por uno o varios ventiladores se combina, en la salida de los difusores, con gotas previamente pulverizadas por presión a través de los dispositivos de salida.

En los últimos años, algunos estudios han investigado la incorporación de tecnología electrostática en equipos diseñados para trabajar en marcos de plantación semiintensivos y superintensivos. En esta línea, se han obtenido resultados diversos sobre la eficiencia de aplicación en dichos equipos en condiciones de carga, que se ha visto estrechamente vinculada a parámetros de aplicación específicos cuyo estudio en equipos de mayor envergadura ha sido abordado décadas después.

Parámetros de aplicación como el voltaje, la presión del fluido, el tamaño de gota o la distancia de aplicación han resultado ser determinantes en la carga adquirida por las gotas, cuantificada mediante la ratio carga-masa (CMR, mC kg-1), ampliamente descrita en la bibliografía [7-9]. Aunque, en general, dichos autores obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a mayor deposición de producto en condiciones de pulverización electrostática, con incrementos de hasta un 44% en la deposición total obtenidos por Pascuzzi y Cerruto [7] o una reducción del 68% en el volumen total de aplicación, obtenidos por Salcedo et al. [10], estos últimos concluyeron también, en un estudio posterior [11] realizado sobre tres pulverizadores electrostáticos, que las diferencias en la deposición no se debían al uso de la electrostática en sí, sino a las características del equipo.

La evaluación de estos equipos debe contemplar, de manera conjunta, el efecto de todas esas variables sobre la capacidad de las gotas de alcanzar zonas del cultivo que no serían accesibles en condiciones de pulverización tradicional o sistema electrostático desconectado. De esta forma, la caracterización previa a la validación en campo de estos equipos es un requisito fundamental para establecer las condiciones de trabajo.

Este estudio se centra en la caracterización de un prototipo de pulverizador electrostático diseñado para trabajar en cultivos tridimensionales en seto, mediante la evaluación de la distribución de aire en el entorno del equipo, el perfil de distribución vertical de producto y la cobertura y deposición obtenidas para diferentes configuraciones del equipo, tanto en superficies expuestas como aquellas dispuestas en el perfil opuesto a la pulverización.

2. Materiales y métodos

2.1. Equipo estudiado

El equipo analizado (Figura 1) es un prototipo de pulverizador electrostático suspendido desarrollado por la empresa Euro Denker S.L. bajo su marca comercial Tecnostatic (Tecnostatic, Zaragoza, España). Consta de un tanque de 300 L de capacidad y 14 boquillas electrostáticas (7 a cada lado de la máquina), unidas a un brazo móvil que permite variar la distancia de aplicación al cultivo y la dirección de la pulverización de cada sección.

Figura 1. Equipo electrostático caracterizado

2.2. Caracterización del mapa de viento

Se llevó a cabo un estudio del mapa de viento generado en el entorno del equipo con el objetivo de caracterizar el comportamiento del módulo de velocidad del aire ($m \cdot s^{-1}$) bajo dos configuraciones de presión del sistema neumático, reguladas a través de la toma de fuerza del tractor. Para ello, se utilizó un anemómetro ultrasónico tridimensional WindMaster (Gill Instruments Limited, Hampshire, Reino Unido), siguiendo la metodología descrita por Vigo-Morancho et al. [12]. El anemómetro se montó sobre un mástil vertical, el cual iba fijado a una estructura móvil con desplazamiento constante (0,20 m s^{-1}) orientada perpendicularmente al flujo de aire. Este sistema permitió realizar un barrido de mediciones en un plano vertical y registrar las tres componentes del vector velocidad del aire a una frecuencia de 10 Hz. Esta metodología permitió identificar el punto donde el módulo de velocidad alcanzaba su valor máximo y se llevó a cabo a ambos lados del equipo, izquierdo y derecho según la vista trasera.

Las mediciones se realizaron a distintas alturas respecto al suelo (desde 40 hasta 150 cm, en intervalos de 10 cm) y a diferentes distancias respecto a las boquillas (20, 35, 50, 65, 80 y 95 cm). Las dos configuraciones del pulverizador correspondieron a presiones del sistema neumático de 0,6 bar (baja presión, BP) y 1,1 bar (alta presión, AP). Se realizaron cinco repeticiones por configuración, generando una matriz total de 1440 datos.

2.3. Perfil de distribución vertical

Previo a la evaluación de la distribución vertical del producto, se realizó la caracterización del caudal de las boquillas conforme a la norma UNE-EN ISO 16122-3:2015 [13]. Para ello, se cuantificó el volumen de líquido pulverizado durante un intervalo de 60 segundos, calculándose el caudal (L min^{-1}) en cada una de las catorce boquillas bajo las configuraciones indicadas en la Tabla 1. Se verificó que la desviación individual del caudal de cada boquilla respecto al valor promedio no superara el 10%, en cumplimiento con los requisitos establecidos para equipos no comerciales según la normativa vigente.

Adicionalmente, se determinó la relación carga-masa (charge-to-mass ratio, CMR) mediante un dispositivo cónico metálico conectado a un multímetro, que permitió registrar la corriente eléctrica (μA) generada por el flujo de agua pulverizada. A partir del caudal obtenido en la medición de las boquillas, se calculó el CMR para cada una de las configuraciones evaluadas.

Tabla 1. Configuraciones del equipo seleccionadas para la caracterización de las boquillas y perfil de distribución vertical.

Nomenclatura[1]	**Velocidad de la toma de fuerza (r min^{-1})**	**Presión líquido (bar)**
BP1.0	330	1.0
BP2.0	330	2.0
AP2.0	450	2.0
AP3.5	450	3.5

[1] BP: Baja presión; AP: Alta presión.

Se evaluó el perfil de distribución vertical del líquido pulverizado para las distintas configuraciones del equipo a tres distancias de aplicación (35, 65 y 95 cm desde las boquillas). Para ello, se utilizó un banco de pruebas vertical del fabricante AMMS-Salvarani, equipado con colectores de PVC de 20 × 20 cm, dispuestos de forma alterna cada 20 cm en altura sobre una plataforma móvil. Esta estructura permite la acumulación continua del líquido pulverizado, el cual incide perpendicularmente sobre los colectores. Así, se registró el volumen (mL) captado por cada uno, lo que permitió construir un perfil detallado de la distribución del producto en función de la altura.

2.4. Cobertura y deposición

Se realizó un estudio de la efectividad del sistema electrostático en condiciones de laboratorio, mediante un ensayo en situación estática del pulverizador. En este

ensayo, el líquido pulverizado fue dirigido hacia un dispositivo móvil, sobre el cual se colocaron papeles hidrosensibles, para evaluar el porcentaje de área cubierta, y papeles de filtro, para cuantificar la cantidad de producto depositado (μg cm^{-2}), tal como se muestra en la Figura 2. En concreto, se colocaron siete papeles de cada tipo sobre la superficie orientada hacia la pulverización (denominada en adelante "haz") y sobre la superficie opuesta (denominada "envés"). Se evaluaron las configuraciones presentadas en la Tabla 1 de la sección 2.3, tanto con el sistema electrostático activado (ES) como desactivado (NES) para cada una de ellas.

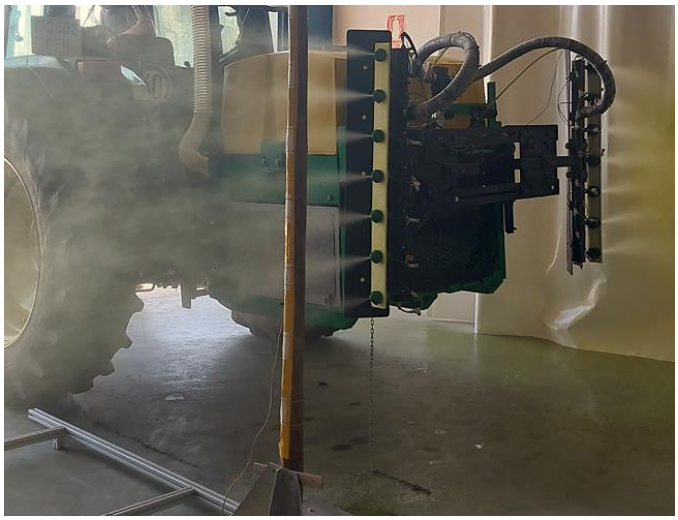


Figura 2. Disposición de papeles receptores en el perfil vertical del objetivo artificial durante la pulverización.

Los papeles hidrosensibles fueron analizados mediante el software de análisis de imagen ImageJ, el cual permitió determinar el porcentaje de área cubierta. En paralelo, los filtros se procesaron en laboratorio para cuantificar la cantidad de producto depositado. Para ello, se extrajo el trazador, tartrazina (E102), previamente incorporado al tanque a una concentración de 2 g L^{-1}, y se determinó su concentración mediante espectrofotometría, utilizando un espectrofotómetro UV2 UNICAM (ThermoScientific, Karlsruhe, Alemania).

2.5. Tratamiento de datos

Tras el análisis descriptivo inicial de los datos, se realizó un análisis estadístico con el objetivo de identificar diferencias atribuibles a los parámetros de aplicación, como la configuración del sistema electrostático (ES vs. NES), la presión de aire (BP vs. AP) o agua seleccionada, y la distancia de aplicación, sobre las variables dependientes estudiadas. En el caso del módulo de velocidad del aire y del volumen de líquido pulverizado, se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el perfil de distribución. Por otro lado, en la evaluación de la eficacia del sistema electrostático, basada en la cobertura y la deposición, los datos no siguieron una

distribución normal, por lo que se emplearon pruebas no paramétricas, específicamente el test de Kruskal-Wallis.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del mapa de viento

Se observó un perfil de distribución heterogéneo en las distancias de medición más próximas (20 y 35 cm), con desviaciones elevadas en ambas configuraciones de aire. Esta variabilidad se atribuyó a la falta de solape entre los flujos de aire generados por cada boquilla. A medida que se incrementó la distancia de trabajo, el perfil vertical tendió a homogeneizarse en altura (Figura 3), evidenciándose además una mayor simetría en ambos lados del equipo.

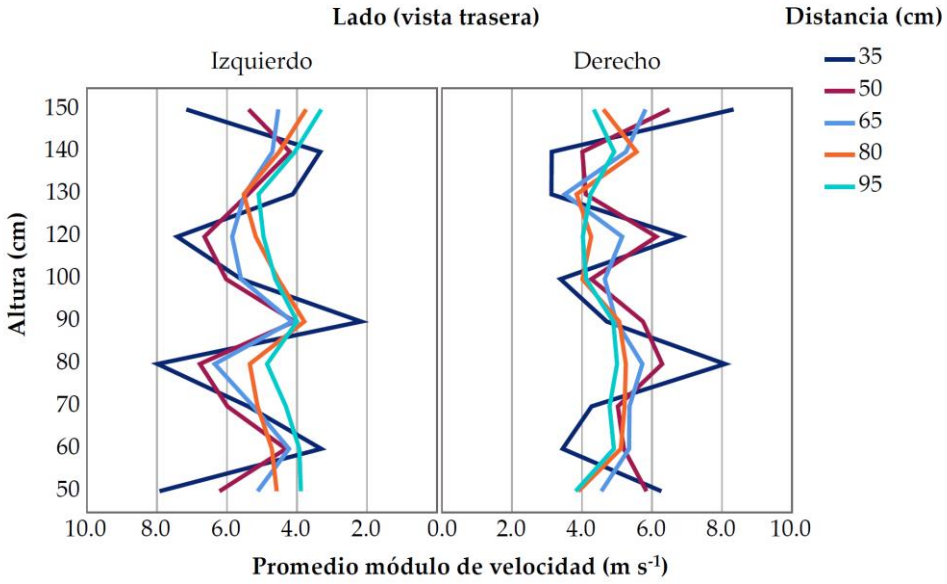


Figura 3. Módulo de velocidad de aire (m s^{-1}) en función de la distancia de aplicación (cm), altura (cm) y lado del equipo estudiado.

La Tabla 2 muestra resultados obtenidos sobre el módulo de velocidad de aire, promediados por alturas y lado del equipo, obtenidos en función de la distancia de aplicación y la configuración del sistema neumático. Se descartaron las alturas de 40 y 150 cm puesto que el abanico generado por la primera y última boquilla respecto al suelo, respectivamente, no alcanzaba en su totalidad al sensor debido a la posición relativa del mismo, registrándose valores intermitentes de aire en todas las repeticiones. El análisis univariado no mostró interacción significativa entre las variables distancia y configuración de aire, indicando un comportamiento similar en la evolución del módulo de velocidad, aunque con diferentes magnitudes. En ambos casos, dicho módulo disminuyó significativamente al superar los 65 cm de distancia de aplicación ($p < 0.05$).

Tabla 2. Valor promedio (± DE) del módulo de velocidad (m s^{-1}) determinado en función de la distancia de aplicación (cm) y de la configuración del sistema neumático (BP: baja presión; AP: alta presión).

Distancia (cm)	BP (0.6 bar)			AP (1.1 bar)		
	Media ± DE[1]	Mínimo	Máximo	Media ± DE	Mínimo	Máximo
20	4.01 ± 2.76	0.79	9.09	5.39 ± 3.63	0.88	12.49
35	4.78 ± 1.85	1.60	8.54	5.82 ± 2.47	1.75	9.98
50	4.71 ± 1.03	2.49	7.43	6.10 ± 1.35	3.24	9.12
65	4.51 ± 0.81	2.47	6.72	5.65 ± 0.93	3.42	7.89
80	4.15 ± 0.70	2.61	5.75	5.23 ± 0.81	3.25	6.81
95	3.92 ± 0.54	2.66	5.14	4.88 ± 0.77	3.18	6.34

[1] DE: Desviación estándar.

3.2. Perfil de distribución vertical

La Tabla 3 muestra los estadísticos descriptivos en la cuantificación del caudal (mL min^{-1}) obtenidos en cada una de las configuraciones de toma de fuerza y presión de agua, considerándose todas las boquillas de la misma tipología.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos en el estudio del caudal nominal (mL min^{-1}) en función de las configuraciones del sistema neumático e hidráulico.

Configuración[1]	Caudal (mL min^{-1})		
	Mínimo	Máximo	Media ± DE[1]
BP1.0	132.00	150.00	137.76 ± 4.91
BP2.0	180.00	196.00	187.81 ± 3.95
AP2.0	180.00	200.00	189.93 ± 4.74
AP3.5	230.00	260.00	245.69 ± 6.68

[1] BP y AP representan valores de presión baja (0.6 bar) y alta (1.1 bar), respectivamente, en el circuito neumático. Valores numéricos 3.5; 2.0 y 1.0 indican presión del circuito hidráulico.

Se observó una variabilidad mínima en los resultados dentro de cada configuración. Este aspecto es especialmente relevante en equipos cuyo rango de trabajo opera

con caudales bajos, ya que, en algunos casos y para equipos de tipología similar, se han observado desviaciones superiores al 10% [7].

No se observaron diferencias significativas en la carga de las gotas en función de la presión de aire, aunque al aumentar la presión a 3.5 bar se observó una ligera disminución en la corriente registrada, que pasó de 27 µA a 25 µA. Considerando los caudales anteriores, se obtuvieron valores de CMR de 6.60, 8.60 y 11.75 mC kg^{-1} para presiones de 1.0, 2.0 y 3.5 bar, respectivamente. Estos resultados se alinean con aquellos obtenidos por otros autores en la evaluación de equipos con tamaños de gota inferiores a 100 µm, donde se establecen valores óptimos de CMR en torno a los 10 mC kg^{-1} [7, 14].

La Figura 4 presenta los valores promedio de volumen de agua registrado en función de la altura, obtenidos a partir del ensayo de distribución vertical con el banco de pruebas, considerando distintas distancias de aplicación, las cuatro configuraciones seleccionadas y ambos lados del equipo. En todos los casos, la configuración asociada a la mayor presión de aire y agua (AP3.5) mostró los volúmenes totales acumulados más elevados, lo cual se atribuye al mayor caudal aplicado bajo esa condición (caudal nominal de 245.7 mL min^{-1} por boquilla). En contraste, al comparar las configuraciones AP2.0 y BP2.0, con la misma presión hidráulica pero distinta presión de aire, no se observaron incrementos significativos en el volumen acumulado al aumentar la presión de aire, independientemente de la distancia de aplicación. De hecho, a 35 cm, la distancia más próxima evaluada, se registró un volumen significativamente mayor ($p < 0.05$) con la configuración BP2.0 en comparación con AP2.0. Este comportamiento podría deberse a un exceso de caudal de aire en la configuración AP2.0, que habría generado un efecto de pantalla sobre los colectores del banco, reduciendo así la entrada del líquido pulverizado.

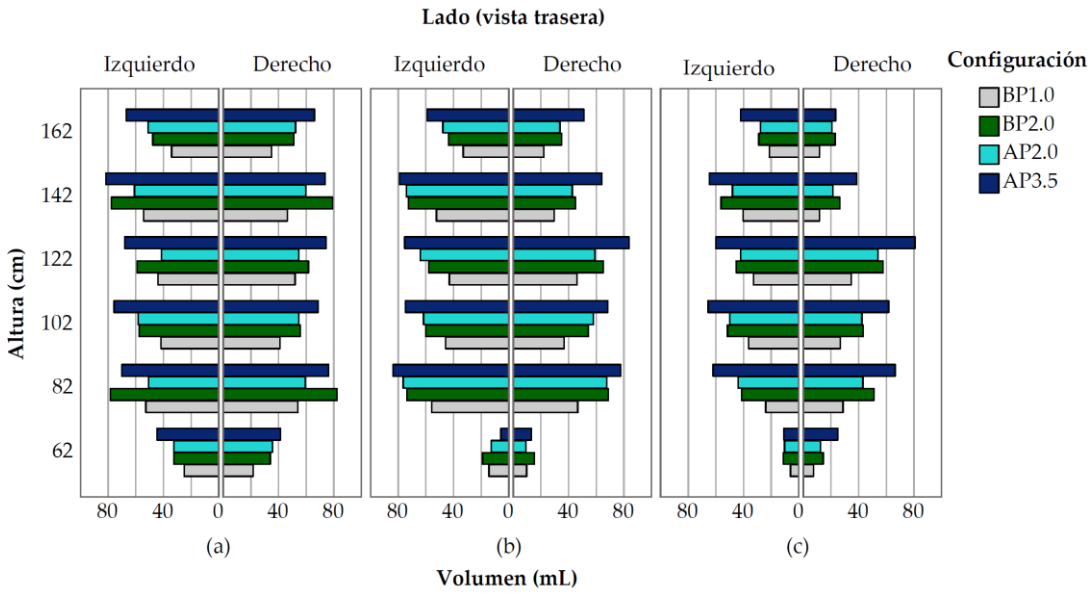


Figura 4. Perfil de distribución vertical (mL) obtenido en función de la altura y configuración del equipo, para las distancias (a) 35 cm; (b) 65 cm y (c) 95 cm. Volumen BP y AP representan valores de presión baja (0.6 bar) y alta (1.1 bar), respectivamente, en el circuito neumático. Valores numéricos 1.0; 2.0 y 3.5 indican presión del circuito hidráulico.

Tras observarse una mayor homogeneidad de los resultados a distancias en torno a los 65 cm, tanto en términos de velocidad de aire como de volumen acumulado para las configuraciones del equipo, se decidió llevar a cabo los ensayos de deposición en laboratorio a una distancia de 65 cm, sobre el lado izquierdo (vista trasera) del equipo.

3.3. Cobertura y deposición

Los resultados obtenidos en condiciones estáticas evidenciaron diferencias entre las configuraciones del sistema electrostático (ES/NES), particularmente en la cara posterior del objetivo (envés), donde se registraron valores significativamente inferiores de cobertura y deposición, e incluso, en numerosos casos, no se detectó presencia de producto. La Figura 5 muestra los valores promedio del porcentaje de cobertura obtenidos en el envés, en función de la configuración del equipo y de la conexión del sistema electrostático. En todas las configuraciones evaluadas, la cobertura promedio fue inferior al 10%. Destacó una disminución significativa en la configuración BP2.0, independientemente de la activación del sistema electrostático, lo que sugiere una posible pérdida de producto por gravedad, puesto que en ese caso se observó una mayor cobertura en las zonas inferiores del objetivo, patrón que no se repitió bajo condiciones de mayor presión de aire (configuración AP2.0), donde el aporte de flujo podría haber favorecido una distribución más uniforme.

Respecto a los resultados sobre cantidad de producto depositado, en general, la activación del sistema electrostático (ES) resultó en una mayor deposición, con un incremento de hasta el 66% respecto a la configuración NES, para la cual no se detectó trazador en el envés del objetivo en ningún caso (Figura 6). El análisis estadístico para los valores de deposición (μg cm^{-2}) en los filtros reveló diferencias significativas entre las configuraciones evaluadas. Bajo el sistema electrostático en funcionamiento, la configuración AP3.5 presentó la mayor deposición promedio, con un valor de 13,99 μg cm^{-2}, significativamente superior al resto de configuraciones ($p < 0,05$). Por su parte, las configuraciones BP1.0; BP2.0 y AP2.0 presentaron valores promedio de 6,23; 8,30 y 8,56 μg cm^{-2}, respectivamente, sin diferencias significativas sobre la deposición. Tras la desconexión del sistema electrostático (NES), la configuración AP3.5 presentó el valor más alto de deposición (9,58 μg·cm^{-2}), significativamente superior al registrado con la configuración BP1.0 (5,77 μg·cm^{-2}). No se observaron diferencias significativas entre AP3.5 y las configuraciones intermedias BP2.0 (6,76 μg·cm^{-2}) y AP2.0 (7,03 μg·cm^{-2}), que se

agruparon estadísticamente en ambos subconjuntos homogéneos. Estos resultados indican que, en ausencia de carga electrostática, el aumento de presión sigue teniendo un efecto sobre la deposición, aunque con menor intensidad y con solapamiento entre tratamientos.

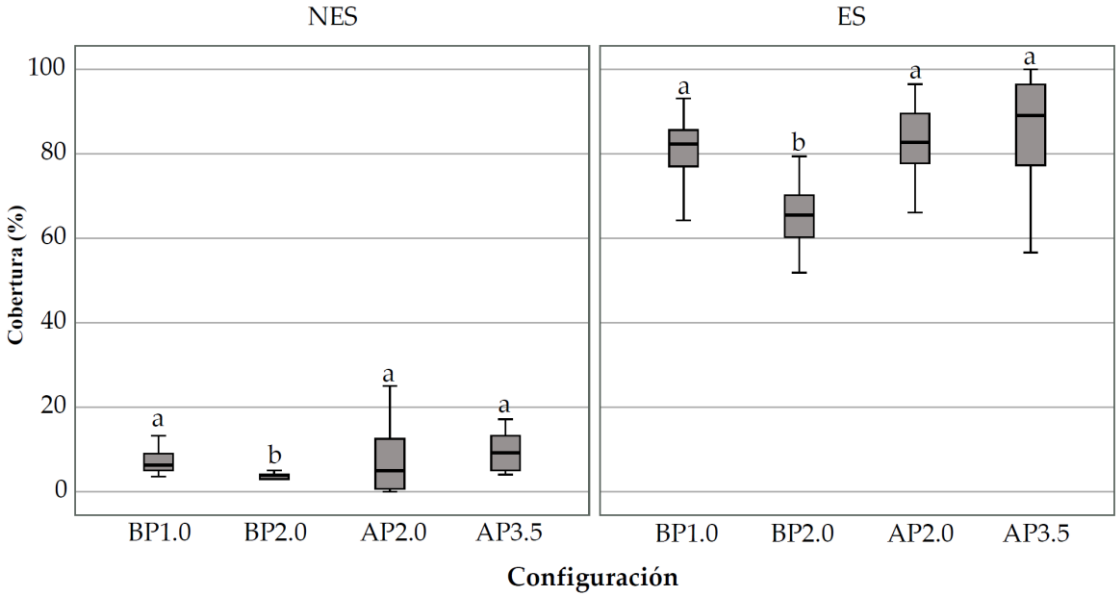


Figura 5. Efecto de la conexión del sistema electrostático y la configuración del pulverizador sobre el porcentaje de cobertura (%). BP y AP hacen referencia a baja presión de aire (0.6 bar) y alta presión de aire (1.1 bar), respectivamente. Los valores 1.0, 2.0 y 3.5 corresponden a la presión del líquido (bar). Para una configuración determinada del sistema electrostático, letras distintas indican diferencias significativas entre configuraciones ($p < 0.05$).

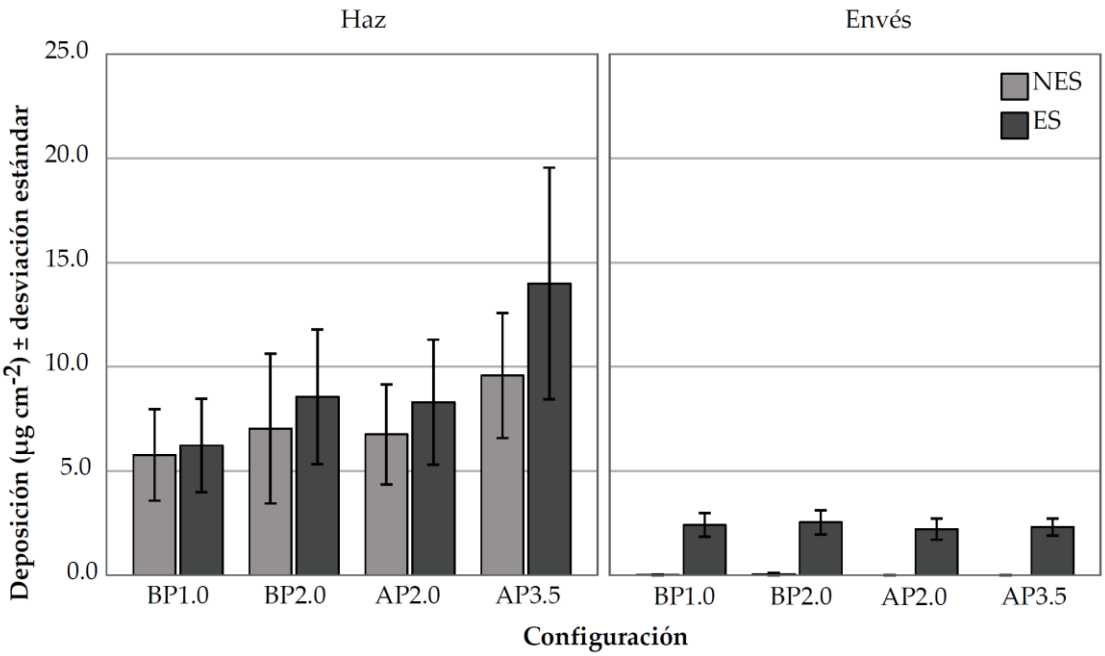


Figura 6. Deposición promedio ± desviación estándar (µg cm^{-2}) obtenida en función del sistema electrostático y la configuración del pulverizador. BP y AP hacen referencia a baja presión de aire (0.6 bar) y alta presión de aire (1.1 bar), respectivamente. Los valores 1.0,

2.0 y 3.5 corresponden a la presión del líquido (bar). ES/NES indican sistema electrostático conectado/desconectado, respectivamente.

Tras la caracterización del prototipo en condiciones de laboratorio, y considerando los resultados obtenidos en relación con el aumento de la deposición de producto mediante la activación del sistema electrostático, se plantea la necesidad de validar esta tecnología en condiciones reales de aplicación. La evaluación en campo permitirá compararla con las prácticas convencionales y valorar aspectos clave como la reducción de la deriva, pérdidas por gravedad o la eficacia biológica del tratamiento y, por tanto, la viabilidad de su implementación.

4. Conclusiones

Este estudio permitió caracterizar un pulverizador con tecnología electrostática en condiciones de laboratorio, destacando los siguientes resultados:

- Las presiones de aire seleccionadas generaron perfiles de velocidad de aire diferenciados, con mayor homogeneidad a distancias intermedias y una disminución significativa del módulo de velocidad a partir de los 65 cm de distancia de aplicación.
- La relación carga-masa (CMR) de las gotas pulverizadas disminuyó con el caudal,obteniéndose una menor proporción de gotas cargadas en los caudales más elevados.
- La evaluación del perfil de distribución vertical permitió identificar distancias óptimas para la selección de mayores caudales de aire.
- La activación del sistema electrostático mejoró la cobertura y deposición de producto, especialmente en el envés del objetivo, en todas las configuraciones evaluadas.

Author Contributions: Conceptualization: F.J.G.-R. and M.V.-C.; Methodology: A.V.-M., M.V.-M., H.M.-L., A.J-J., S.A.-G., M.V.-C. and F.J.G.-R.; Software: A.V.-M., M.V.-M. and F.J.G.-R.; Validation: A.V.-M., M.V.-M. and F.J.G.-R.; Formal Analysis: A.V.-M., M.V.-M. and F.J.G.-R.; Investigation: A.V.-M., M.V.-M., H.M.-L., A.J-J., S.A.-G., M.V.-C. and F.J.G.-R.; Resources: A.V.-M.; Data Curation: A.V.-M., M.V.-M. and F.J.G.-R.; Writing - Original Draft Preparation: A.V.-M.; Writing - Review & Editing: A.V.-M., M.V.-M. and F.J.G.-R.; Visualization: A.V.-M.; Supervision: M.V.-M., M.V.-C. and F.J.G.-R.; Project administration: F.J.G.-R.; Funding acquisition: F.J.G.-R.

Funding: This publication was developed within the framework of the Cooperation Group project 'Precision Agriculture for the Improvement of Phytosanitary Treatments in Vineyards (VITIS AP)', under the Rural Development Program for Aragón 2014–2022 (Order AGM/59/2022).

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: The authors wish to thank the company Euro Denker S.L. (Tecnostatic) for its collaboration in the technological development of this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Law, S.E., S. Thompson and W. Balachandran. Electroclamping forces for controlling bulk particulate flow: charge relaxation effects. Journal of Electrostatics (1996). 37(1-2), 79-93.
2. Patel, M.K., A. Khanchi, A. Chauhan, A. Kumar, S.R.K. Akkireddi, A. Jangra, R. Kanawade, N. Manivannan and G.R. Mitchell. Real-time measurement of droplet size and its distribution of an air-induced air-assisted electrostatic nozzle. Journal of Electrostatics (2022). 115, 103665. doi: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103665
3. Mostafaie Maynagh, B., B. Ghobadian, T. Tavakkoli Hashjin and M. Jahannama. Effect of electrostatic induction parameters on droplets charging for agricultural application. Journal of Agricultural Science and Technology (2009). 11(3), 249-257.
4. Khatawkar, D.S., D. Dhalin, P.S. James and S.R. Subhagan. Electrostatic induction spray-charging system (embedded electrode) for knapsack mist-blower. Current Journal of Applied Science and Technology (2020). 39(5), 80-91.
5. Mamidi, V.R., C. Ghanshyam, P.M. Kumar and P. Kapur. Electrostatic hand pressure knapsack spray system with enhanced performance for small scale farms. Journal of Electrostatics (2013). 71(4), 785-790. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.011
6. Maski, D. andD. Durairaj. Effects of charging voltage, application speed, target height, and orientation upon charged spray deposition on leaf abaxial and adaxial surfaces. Crop Protection (2010). 29(2), 134-141. doi: 10.1016/j.cropro.2009.10.006
7. Pascuzzi, S. andE. Cerruto. Spray deposition in "tendone" vineyards when using a pneumatic electrostatic sprayer. Crop Protection (2015). 68, 1-11. doi: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.11.006
8. Patel, M.K., B. Praveen, H.K. Sahoo, B. Patel, A. Kumar, M. Singh, M.K. Nayak and P. Rajan. An advance air-induced air-assisted electrostatic nozzle with enhanced performance. Computers and Electronics in Agriculture (2017). 135, 280-288. doi: https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.010
9. Salcedo, R., J. Llop, J. Campos, M. Costas, M. Gallart, P. Ortega and E. Gil. Evaluation of leaf deposit quality between electrostatic and conventional multi-row sprayers in a trellised vineyard. Crop Protection (2020). 127, 104964. doi: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104964
10. Salcedo, R., H. Zhu, Z. Zhang, Z. Wei, L. Chen, E. Ozkan and D. Falchieri. Foliar deposition and coverage on young apple trees with PWM-controlled spray systems. Computers and Electronics in Agriculture (2020). 178, 105794.
11. Salcedo, R., E. Sánchez, H. Zhu, X. Fàbregas, F. García-Ruiz and E. Gil. Evaluation of an electrostatic spray charge system implemented in three conventional orchard sprayers used on a commercial apple trees plantation. Crop Protection (2023). 167, 106212. doi: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106212
12. Vigo-Morancho, A., M. Videgain, A. Boné, M. Vidal and F.J. García-Ramos. Static and dynamic study of the airflow behavior generated by two air assisted sprayers commonly used in 3D crops. Computers and Electronics in Agriculture (2024). 216, 108535. doi: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108535
13. ISO. (1997). Equipment for Crop Protection - Spraying Equipment - Part 2: Test Methods for Hydraulic Sprayers. ISO 5682-2:1997. International Organization for Standardization Publications, Geneva.
14. Lyons, S.M., M.A. Harrison and S.E. Law. Electrostatic application of antimicrobial sprays to sanitize food handling and processing surfaces for enhanced food safety. in Journal of Physics: Conference Series. 2011. IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/301/1/012014.

La definición de equipo intercambiable aplicada a la maquinaria agrícola

Rafael Cano [1], Tamara Ruiz [1]

[1] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Sevilla

rafael.cano@insst.mites.gob.es

tamara.ruiz@insst.mites.gob.es

Resumen: Este trabajo aborda la aplicación de la definición de equipo intercambiable, establecida en la Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas, a la maquinaria agrícola. La inclusión o exclusión de un accesorio agrícola dentro de la definición de equipo intercambiable va a determinar su consideración o no como máquina y por tanto los requisitos que debe cumplir desde el punto de vista de su comercialización. Por otro lado, la aplicación correcta de la definición de equipo intercambiable garantizará que la utilización por las personas trabajadores del conjunto máquina-accesorio sea segura. En el presente trabajo, se indican las diferencias entre herramienta, equipo intercambiable y accesorio de elevación teniendo en cuenta las definiciones recogidas en la Directiva 2006/42/CE. Se exponen los equipos intercambiables que pueden acoplarse a un tractor agrícola, cargador frontal o cargador telescópico. Se hace referencia a la información que debe contener el manual de instrucciones de la empresa fabricante referente a las características que deben cumplir los equipos intercambiables y las herramientas destinados a acoplarse a una máquina para garantizar el uso seguro. Todas las observaciones y aclaraciones descritas podrían utilizarse para mejorar la Guía europea para la aplicación de la Directiva 2006/42/CE con el fin de establecer claramente los límites entre las definiciones, facilitando su correcta aplicación.

Palabras clave: agricultura, seguridad, maquinaria, equipo intercambiable.

Abstract: This paper deals with the application of the definition of interchangeable equipment, established in the Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery**,** to agricultural machinery. The inclusion or exclusion of an agricultural attachment within the definition of interchangeable equipment will determine whether it is considered as a machine and therefore the requirements to be met from the point of view of its place on the market. On the other hand, the correct application of the definition of interchangeable equipment will ensure that the use of the machine-attachment combination by workers is safe. The differences between tools, interchangeable equipment and lifting accessories are indicated, taking account of the definitions set out in Directive 2006/42/EC. The interchangeable equipment that can be assembled to an agricultural tractor, front loader or telescopic loader is described. Mention is made of the information that the manufacturer's instructions manual must contain concerning the characteristics that interchangeable equipment and tools intended to be assembled to a machine must meet to ensure safe use. All the comments and clarifications described could be included in the European Guide for the application of Directive 2006/42/EC to clearly establish the boundaries between the definitions, facilitating their correct application.

Keywords: agriculture, safety, machinery, interchangeable equipment.

1. Introducción

El ámbito de aplicación de la Directiva 2006/42/CE [1] (artículo 1.1) abarca las máquinas en sentido estricto, los equipos intercambiables, los componentes de seguridad, los accesorios de elevación, las cadenas, cables y cinchas, los dispositivos amovibles de transmisión mecánica y las cuasi máquinas. Dicha directiva establece las definiciones de máquinas en sentido estricto, equipos intercambiables y accesorios de elevación y la Guía europea para la aplicación de la Directiva 2006/42/CE [2], en adelante Guía europea, contiene comentarios destinados a la mejor comprensión de esas definiciones.

Según el artículo 2, a) de la Directiva 2006/42/CE, una de las acepciones de máquina entendida en sentido estricto es el "conjunto de partes o componentes vinculados entre sí, de los cuales al menos uno es móvil, asociados para una aplicación determinada, provisto o destinado a estar provisto de un sistema de accionamiento distinto de la fuerza humana o animal, aplicada directamente".

De acuerdo con el artículo 2, b) de la Directiva 2006/42/CE, el equipo intercambiable es el "dispositivo que, tras la puesta en servicio de una máquina o de un tractor, sea acoplado por el propio operador a dicha máquina o tractor para modificar su función o aportar una función nueva, siempre que este equipo no sea una herramienta". Los equipos intercambiables son considerados máquinas en sentido amplio.

La Guía europea indica que, como consecuencia de su inclusión en el ámbito de aplicación de la Directiva 2006/42/CE, cada equipo intercambiable deberá estar provisto del marcado CE y suministrarse con su declaración CE de conformidad y su manual de instrucciones. Los equipos acoplados a una máquina por la empresa fabricante que no están destinados a ser cambiados por el operador o la operadora no se consideran equipos intercambiables, sino partes de la máquina. Las piezas de repuesto no son equipos intercambiables porque están destinadas simplemente a sustituir piezas desgastadas o dañadas.

Por otro lado, el artículo 2, d) de la Directiva 2006/42/CE, define el accesorio de elevación como el "componente o equipo que no es parte integrante de la máquina de elevación, que permita la prensión de la carga, situado entre la máquina y la carga, o sobre la propia carga, o que se haya previsto para ser parte integrante de la carga y se comercialice por separado". Los accesorios de elevación tienen la consideración de máquinas en sentido amplio.

La Guía europea recalca la diferencia entre accesorio de elevación y equipo intercambiable para elevar cargas. El accesorio de elevación no es parte integrante de la máquina de elevación y está situado entre la máquina y la carga o sobre la propia carga mientras que el equipo intercambiable utilizado para elevar cargas está acoplado a la máquina y siempre agarra la carga de una forma u otra.

2. Materiales y métodos

Se plantearon en el Grupo ADCO Maquinaria Agrícola (grupo europeo especializado para la vigilancia del mercado en el sector de la maquinaria agrícola) un conjunto de preguntas en relación con la aplicación correcta de la definición de equipo intercambiable a esas máquinas. A continuación, se indican las preguntas formuladas.

Pregunta 1: ¿Un dispositivo de prensión de la carga de un cargador frontal que no dispone de elementos móviles (por ejemplo, la horquilla) puede considerarse equipo intercambiable según la Directiva 2006/42/CE?

Pregunta 2: ¿Puede considerarse que la pala simple (pala que no dispone de elementos móviles) destinada a formar parte de un cargador frontal es un equipo intercambiable?

Pregunta 3: ¿El cargador frontal es una máquina o un equipo intercambiable?

Pregunta 4: ¿Qué información debe proporcionar el fabricante del equipo intercambiable para garantizar la compatibilidad entre la máquina de base y el equipo intercambiable?

Pregunta 5: ¿Qué información debe proporcionar el fabricante del cargador frontal en relación con los dispositivos de prensión de la carga?

En primer lugar, para dar respuesta a estas preguntas se realiza una recopilación de diferentes tipos de accesorios que se utilizan para realizar las tareas agrícolas acoplados a tractores agrícolas u otros equipos de trabajo. Estos accesorios pueden carecer o disponer de elementos móviles. Tomando como referencia la nomenclatura establecida en la Directiva 2006/42/CE y en las normas armonizadas de maquinaria agrícola, los accesorios que carecen de elementos móviles se denominan herramientas (por ejemplo, un arado de púas acoplado a tractor) y los que están provistos de elementos móviles se designan como equipos intercambiables (por ejemplo, un rotocultor).

A su vez, existen distintos tipos de equipos intercambiables, como los indicados a continuación:

Equipos intercambiables acoplados al enganche tripuntal de un tractor agrícola situado en la parte delantera o trasera (como abonadoras, rotocultores, sembradoras y arados reversibles).

Equipos intercambiables instalados en un tractor agrícola, como cargadores frontales y retroexcavadoras.

Equipos intercambiables acoplados a los brazos elevadores de un cargador frontal (una pinza o una pala con garra) o de una retroexcavadora.

Equipos intercambiables acoplados al brazo de un cargador telescópico agrícola (una pinza o una pala con garra).

En el Apéndice A se muestran ejemplos de herramientas y equipos intercambiables utilizados en agricultura.

3. Resultados y discusión

Los documentos de referencia utilizados para elaborar las respuestas han sido la Directiva 2006/42/CE, la Guía europea y la norma UNE-EN 12525 [3].

Pregunta 1: ¿Un dispositivo de prensión de la carga de un cargador frontal que no dispone de elementos móviles (por ejemplo, la horquilla) puede considerarse equipo intercambiable según la Directiva 2006/42/CE?

Respuesta 1: Un equipo intercambiable no puede ser una herramienta, según la definición de equipo intercambiable de la Directiva 2006/42/CE. Se hace necesario establecer un criterio que permita distinguir entre equipo intercambiable y herramienta. Hay que tener en cuenta que tanto el equipo intercambiable como la herramienta pueden modificar la función de la máquina (cargador frontal, en este caso) o añadir una nueva función. Por tanto, el criterio que se aplica es la presencia o no de elementos móviles. Un dispositivo de prensión de la carga que dispone de elementos móviles (una pinza) se considera equipo intercambiable, pero si no tiene elementos móviles (una horquilla) se considera herramienta. Para evitar confusión en la aplicación de este criterio se sugiere revisar el comentario 41 de la Guía europea.

Pregunta 2: ¿Puede considerarse que la pala simple (pala que no dispone de elementos móviles) destinada a formar parte de un cargador frontal es un equipo intercambiable?

Respuesta 2: Atendiendo a las definiciones de la Directiva 2006/42/CE, la pala simple no es un equipo intercambiable porque no dispone de elementos móviles.

Pregunta 3: ¿El cargador frontal es una máquina o un equipo intercambiable?

Respuesta 3: Es un equipo intercambiable porque cumple con la definición de equipo intercambiable de la Directiva 2006/42/CE al añadir al tractor agrícola las funciones de elevación de cargas y de transporte de material tras ser acoplado por el operador o la operadora. A su vez, el cargador frontal puede estar provisto de una herramienta o de otro equipo intercambiable.

Pregunta 4: ¿Qué información debe proporcionar el fabricante del equipo intercambiable para garantizar la compatibilidad entre la máquina de base y el equipo intercambiable?

Respuesta 4: La Guía europea indica que los equipos intercambiables pueden ser comercializados por la empresa fabricante de la máquina de base o por otro fabricante. La empresa fabricante del equipo intercambiable debe asegurarse de que la combinación del equipo intercambiable y la máquina de base en la que va a ser instalado cumple los requisitos esenciales de seguridad y salud del anexo I de la Directiva 2006/42/CE que sean aplicables, y debe llevar a cabo los procedimientos de evaluación de la conformidad que sean adecuados.

En cualquier caso, la empresa fabricante del equipo intercambiable debe especificar en su manual de instrucciones las máquinas en las que estos equipos pueden instalarse y utilizarse en condiciones de seguridad, ya sea haciendo referencia a las características técnicas de la máquina o a modelos de máquinas específicos. También la empresa fabricante debe suministrar las instrucciones necesarias para su instalación y su utilización en condiciones de seguridad.

Pregunta 5: ¿Qué información debe proporcionar el fabricante del cargador frontal en relación con los dispositivos de prensión de la carga?

Respuesta 5: En relación con los cargadores frontales, la norma UNE-EN 12525 (norma que confiere la presunción de conformidad con los requisitos esenciales de seguridad y salud de la Directiva 2006/42/CE) indica el contenido del manual de instrucciones del cargador frontal en cuanto a la utilización de los dispositivos de prensión de la carga previstos para formar parte del cargador frontal. Debe proporcionar información sobre los dispositivos de prensión de la carga permitidos y su uso, el montaje correcto en los brazos elevadores y las comprobaciones antes del uso. Debe comprobarse que la fijación del dispositivo de prensión de la carga en los brazos elevadores es segura cada vez que el cargador frontal sea utilizado.

4. Conclusiones

Este proceso ha permitido clarificar los conceptos de herramienta y equipo intercambiable aplicados a la maquinaria agrícola. Los resultados del análisis efectuado podrían aprovecharse para mejorar los comentarios dedicados a equipos intercambiables en la Guía europea y los aspectos relacionados con la compatibilidad de los dispositivos de prensión de la carga del cargador frontal en el texto de la norma UNE-EN 12525.

Apéndice A

En esta sección se incluyen fotografías a modo de ejemplo de varios tipos de herramientas y equipos intercambiables.

<table>
<tr>
<td>
Arado de púas
(herramienta)</td>
<td>
Abonadora
(equipo intercambiable)</td>
</tr>
<tr>
<td>
Arado reversible
(equipo intercambiable)</td>
<td>
Cargador frontal
(equipo intercambiable)</td>
</tr>
</table>

 Retroexcavadora (equipo intercambiable)	 Horquilla de un cargador frontal (herramienta)
 Pinza de un cargador frontal (equipo intercambiable)	 Pala con garra de un cargador frontal (equipo intercambiable)
 Pinza de un cargador telescópico (equipo intercambiable)	 Pala con garra de un cargador telescópico (equipo intercambiable)

Referencias

1. Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas.
2. Guide to the application of the Machinery Directive 2006/42/EC. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Edition 2.3, April 2024 (Update of 2nd Edition).
3. UNE-EN 12525:2020. Maquinaria agrícola. Cargadores frontales. Seguridad.

Adecuación de las normas armonizadas de maquinaria agrícola a los nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad del Reglamento (UE) 2023/1230

Tamara Ruiz[1], Rafael Cano[1]

[1] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST);

tamara.ruiz@insst.mites.gob.es; rafael.cano@insst.mites.gob.es

Resumen: El Reglamento de Máquinas (UE) 2023/1230, que entrará plenamente en vigor en enero de 2027, introduce nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad (RESS) para maquinaria agrícola en la Unión Europea y modifica algunos de los RESS establecidos por la actual Directiva 2006/42/CE, de Máquinas. En respuesta a esta nueva regulación, las normas armonizadas elaboradas por el CEN/TC 144/WG1, cuyo cumplimiento confiere presunción de conformidad con los RESS de la directiva, deben adecuarse para alinearse con estas nuevas exigencias. Este proceso de adecuación implica una revisión y actualización de las normas armonizadas existentes para garantizar que cumplan con los nuevos criterios establecidos en el Reglamento de Máquinas. Los cambios introducidos por el reglamento buscan mejorar la seguridad de las tecnologías tradicionales y abordar los nuevos riesgos relacionados con las tecnologías digitales emergentes, tales como los riesgos asociados a las máquinas autónomas, la inteligencia artificial y la ciberseguridad, entre otros. En este trabajo se analiza la metodología seguida para analizar la adecuación de las normas armonizadas afectadas y los resultados en relación con la norma EN ISO 4254-1.

Palabras clave: maquinaria agrícola; máquina; agricultura; seguridad; salud; reglamento; digital.

Abstract: Machinery Regulation (EU) 2023/1230, which will enter fully into force in January 2027, introduces new essential health and safety requirements (EHSRs) for agricultural machinery in the European Union and amends some of the EHSRs established by the current Machinery Directive 2006/42/EC. In response to this new regulation, the harmonised standards developed by CEN/TC 144/WG1, compliance with which confers presumption of conformity with the EHSRs of the directive, must be adapted to align with these new requirements. This alignment process involves a review and update of existing harmonised standards to ensure that they comply with the new criteria set out in the Machinery Regulation. The changes introduced by the regulation aim to improve the safety of traditional technologies and address new risks related to emerging digital technologies, such as risks associated with autonomous machines, artificial intelligence and cybersecurity, among others. This paper discusses the methodology followed to analyse the adequacy of the affected harmonised standards and the results in relation to EN ISO 4254-1.

Keywords: agricultural machinery; agriculture; safety; health; regulation; digital.

1. Introducción

El Reglamento (UE) 2023/1230 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio de 2023, relativo a las máquinas [1], que entrará plenamente en vigor el 20 de enero de 2027, introduce nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad (RESS) que deben cumplir las máquinas agrícolas que se comercialicen en la Unión Europea y modifica algunos de los establecidos por la actual Directiva 2006/42/CE, de Máquinas [2].

Con este nuevo reglamento se pretenden cumplir varios objetivos. Entre ellos, homogeneizar la aplicación de los requisitos que establece a nivel de toda la Unión Europea. A diferencia de las directivas, que requieren la transposición a la normativa de los Estados Miembros, los reglamentos son de aplicación directa y, por tanto, uniforme e inmediata. Además, con su aprobación se busca mejorar la seguridad de las tecnologías tradicionales y abordar los nuevos riesgos relacionados con las tecnologías digitales emergentes, tales como los riesgos asociados a las máquinas autónomas, la inteligencia artificial y la ciberseguridad, entre otros aspectos.

En respuesta a esta nueva regulación, las normas armonizadas, cuyo cumplimiento confiere presunción de conformidad con los RESS de la directiva, deben adecuarse para alinearse con estas nuevas exigencias. Este proceso de adecuación implica una revisión y actualización de las normas armonizadas existentes para garantizar que cumplan con los nuevos criterios establecidos en el Reglamento (UE) 2023/1230.

La Comisión Europea puso en marcha un proceso de análisis en el seno de todos los comités técnicos de normalización europeos, con el fin de determinar para cada una de las normas armonizadas afectadas por el Reglamento (UE) 2023/1230 qué RESS nuevos o modificados estaban lo suficientemente cubiertos y cuáles no. Esto vino motivado por la imposibilidad de abordar la revisión y actualización de todas las normas armonizadas que se han podido ver afectadas por el reglamento en un periodo tan corto de tiempo, desde su publicación en 2023 hasta su plena aplicación en 2027.

Tras ese proceso, y una vez estudiados los resultados de los análisis realizados por los comités, la Comisión Europea pretende transferir tantas normas publicadas bajo la Directiva 2006/42/CE al nuevo reglamento como sea posible, sin la necesidad de su revisión o modificación periódica inmediata.

Además, otro de los objetivos que se perseguía cumplir como resultado de este proceso es ayudar a los comités de normalización en la identificación de las lagunas existentes en las normas armonizadas actuales y a estimar la carga de trabajo necesaria para la futura revisión de todas las normas afectadas.

En el ámbito específico de la seguridad de las máquinas agrícolas, el Grupo de Trabajo 1 del Comité Técnico 144 perteneciente al Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 144/WG1 - Tractores y maquinaria agrícola y forestal) ha llevado a cabo el análisis de catorce normas. Entre ellas, el de la norma EN ISO 4254-1:2015 [3] y su Modificación 1, EN ISO 4254-1:2015/A1:2021 [4], que abordan los requisitos generales de seguridad de las máquinas agrícolas.

Este trabajo se centra en el análisis de la adecuación de la citada norma (y su modificación) a los nuevos y modificados RESS del Reglamento (UE) 2023/1230, por ser una norma general de seguridad que se aplica a todas las máquinas autopropulsadas, suspendidas, semisuspendidas y remolcadas utilizadas en la agricultura.

2. Materiales y métodos

Durante el proceso de análisis, los comités técnicos, en primer lugar, debían indicar para cada norma si los nuevos o modificados RESS resultaban pertinentes o no, es decir, si resultaban de aplicación o no. Por ejemplo, un RESS para neutralizar los riesgos debidos a la movilidad de las máquinas se consideraría no pertinente en el caso de una máquina estacionaria, ya que esta no va a presentar riesgos debidos a su movilidad.

A continuación, para aquellos RESS nuevos o modificados que fueran pertinentes debían informar si estaban cubiertos por la norma o no. Un RESS puede estar cubierto total o parcialmente. En cualquier caso, aunque la norma solo los abordara parcialmente se debía señalar que el requisito estaba cubierto, especificando el apartado o apartados en los que los abordaba. En el caso de los RESS no pertinentes no era necesario indicar si estaban cubiertos o no.

Una vez finalizado el análisis, los comités técnicos enviaron sus resultados a la Comisión Europea, que en última instancia decidirá si una determinada norma puede ser publicada en la primera lista del Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE) con arreglo al nuevo Reglamento (UE) 2023/1230 y con qué alcance, es decir, si se publica con o sin restricciones.

En el análisis únicamente se tuvieron en cuenta los RESS nuevos o modificados. Es decir, se trata de requisitos esenciales que no existían en la Directiva 2006/42/CE o bien que, aun existiendo, han visto modificada su redacción en algún aspecto o en los que se han incorporado nuevas exigencias. Aquellos que ya venían recogidos en la directiva y que no han cambiado en el reglamento no se consideraron en el análisis ni son, por tanto, tratados en el presente documento.

3. Resultados y discusión

En este apartado se describe brevemente el contenido de los nuevos y modificados RESS del Reglamento (EU) 2023/1230 que resultan de aplicación en la norma EN ISO 4254-1 y los aspectos necesarios a considerar en una futura revisión de la norma para cubrir esos requisitos esenciales en su totalidad. Asimismo, se indica el motivo por el que algunos requisitos han sido considerados como no pertinentes.

En el Apéndice A se recogen los resultados completos del análisis de la citada norma.

3.1. Requisitos esenciales de salud y seguridad

3.1.1. Principios de integración de la seguridad

El operador u operadora debe poder probar, en su caso, las funciones de seguridad del equipo, para lo que deberá disponer además de los medios necesarios, de la información acerca de los procedimientos específicos para probar, regular, mantener y utilizar de forma segura dichas funciones. Este requisito modificado se considera que está actualmente cubierto.

3.1.2. Ergonomía

Aunque la actual versión de la norma cubre varios aspectos referentes a la ergonomía, es necesario revisarla para cubrir este RESS en su totalidad. Por ejemplo, en lo que se refiere a que para operar con la máquina no debe ser necesario utilizar posturas forzadas o movimientos de trabajo exigentes. Uno de los aspectos que se ha detectado que se debe corregir teniendo en cuenta los principios ergonómicos es, por ejemplo, la altura mínima requerida para el primer peldaño de los medios de acceso.

En las máquinas diseñadas para funcionar con distintos niveles de autonomía también deberá abordarse la capacidad de responder de forma adecuada a las personas y comunicar de forma comprensible las acciones previstas.

3.1.3. Protección contra la corrupción

La protección de las máquinas y su conexión con otros dispositivos frente a posibles acciones de corrupción, accidentales o intencionadas, que puedan originar situaciones peligrosas, es decir, en materia de ciberseguridad, estará cubierta por la norma EN ISO 24882 [5], actualmente en desarrollo.

3.1.4. Seguridad y fiabilidad de los sistemas de mando

En una futura revisión de la norma EN ISO 4254-1 deberá tenerse en cuenta que los sistemas de mando deben diseñarse y fabricarse de forma que resistan los intentos hostiles razonablemente previsibles de terceras personas que puedan desencadenar situaciones peligrosas.

También deberán registrarse y conservarse los datos relativos a las intervenciones realizadas y a las versiones de software de seguridad instaladas con posterioridad a la puesta en marcha del equipo o a su introducción en el mercado.

Además, en las máquinas parcial o totalmente autónomas no se debe permitir que realicen acciones fuera de su tarea o zona de desplazamiento establecidas y debe ser posible corregir la máquina para mantener su seguridad. En estas, también deben registrarse y conservarse los datos relativos a la toma de decisiones de los sistemas de seguridad basados en software que garanticen una función de seguridad.

3.1.5. Fallo de la alimentación de energía o de la conexión a la red de comunicación

Algunas partes de este requisito modificado podrían estar parcialmente cubiertas por la actual versión de la norma. En cualquier caso, se debe considerar su revisión para cubrirlo en su totalidad. En concreto, se debe garantizar que un fallo en la alimentación de energía de la máquina o de su conexión a la red de comunicación no provoque situaciones peligrosas.

3.1.6. Riesgos relacionados con las partes móviles

La prevención de los riesgos de contacto que puedan originar situaciones peligrosas y del estrés psicológico derivado de la interacción con la máquina debe adaptarse tanto a la interacción persona-máquina como a la coexistencia en espacios compartidos en los que no exista colaboración directa entre ambas.

En la actual versión de la norma es el operador o la operadora quien controla la máquina, no existiendo colaboración ni interacción persona-máquina. No obstante, estos aspectos han de ser tratados en la próxima revisión.

3.1.7. Acceso a los puestos de trabajo o a los puntos de intervención

En aquellas máquinas a cuyo interior se deba acceder para intervenir durante su funcionamiento o para realizar ajustes, tareas de mantenimiento o limpieza, los accesos se deben dimensionar y adaptar de forma que permitan la entrada de equipos de salvamento en caso necesario. Aunque este requisito está parcialmente cubierto por la actual versión de la norma, es necesario su revisión para garantizar que se cubre en su totalidad.

3.1.8. Contenido de las instrucciones de uso

En la futura revisión de la norma se deberán incluir nuevas informaciones en las instrucciones de uso, tales como el montaje e instalación correctos de los equipos relacionados con la reducción del ruido o sobre las precauciones, dispositivos y medios para el rescate de personas, entre otros.

Por otro lado, cuando la máquina, debido a su diseño, emita sustancias o materiales peligrosos, deberá incluir información sobre las características del dispositivo de captación, filtrado o descarga si dicho dispositivo no se suministra con la máquina y acerca del caudal, la concentración de emisiones o la eficacia del dispositivo de captación o filtración, incluyendo en este último caso, las condiciones para mantener dicha eficacia.

3.2. Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para algunas categorías de máquinas y productos relacionados

3.2.1. Máquinas y productos relacionados destinados a los productos alimenticios y máquinas y productos relacionados destinados a los productos cosméticos o farmacéuticos

3.2.1.1. Generalidades

Este nuevo requisito no es aplicable a las máquinas agrícolas, sino a las máquinas y productos relacionados destinados a los productos alimenticios, cosméticos o farmacéuticos, por lo que no sería pertinente para la norma en cuestión.

3.2.2. Máquinas portátiles o guiadas a mano o productos relacionados

3.2.2.1. Generalidades

Este requisito sólo es de aplicación para las máquinas agrícolas portátiles o guiadas a mano. En cambio, el alcance de la norma EN ISO 4254-1 se circunscribe únicamente a las máquinas agrícolas autopropulsadas, remolcadas, suspendidas y semisuspendidas, por lo que las máquinas portátiles o guiadas a mano quedarían fuera del alcance de dicha norma. Este requisito sería, por tanto, no pertinente.

3.2.2.2. Instrucciones de uso

Este requisito tampoco es aplicable a las máquinas agrícolas autopropulsadas, remolcadas, suspendidas o semisuspendidas, para las que la norma EN ISO 4254-1 establece requisitos generales de seguridad, sino a las máquinas agrícolas portátiles o guiadas a mano, por lo que sería igualmente no pertinente.

3.3. Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para neutralizar los riesgos debidos a la movilidad de las máquinas o los productos relacionados

3.3.1. Definiciones

En este apartado no se especifican requisitos esenciales como tales, sino que se incluyen definiciones que sirven para concretar el ámbito de aplicación de los requisitos establecidos en el Capítulo 3 del Anexo III del reglamento. En particular, se incluyen nuevas definiciones tales como máquina móvil autónoma, persona supervisora y función de supervisión. Durante la próxima revisión de la norma se deben abordar las funciones autónomas, haciendo referencia a las normas correspondientes de la serie EN ISO 18497 [6-8].

3.3.2. Asientos

Varios aspectos relacionados con el sistema de retención en las máquinas móviles con estructura de protección deberán abordarse para cubrir en la totalidad este requisito. En el puesto de conducción debe haber una señal visual y sonora que alerte a la persona conductora cuando se encuentre en el puesto de conducción y no esté utilizando el dispositivo de retención. Además, cuando el riesgo de vuelco o inclinación sea significativo y no esté utilizando dicho sistema, la máquina no deberá poder moverse.

Adicionalmente, el diseño de los dispositivos de retención debe tener en cuenta los principios ergonómicos.

3.3.3. Función de supervisión

La función de supervisión en las máquinas móviles autónomas permitirá recibir información de la máquina a distancia, así como la parada, puesta en marcha o el desplazamiento de la máquina a una posición y un estado seguro para evitar causar otros riesgos. Las acciones de parada, puesta en marcha y desplazamiento sólo serán posibles cuando la persona supervisora pueda ver directa o indirectamente la zona de recorrido y de funcionamiento de la máquina y cuando los dispositivos de protección estén operativos.

La información que la persona supervisora reciba de la máquina cuando esté activa la función de supervisión ofrecerá una visión completa y exacta del funcionamiento, el recorrido y el posicionamiento seguro de la máquina y alertará acerca de situaciones imprevistas o peligrosas presentes o inminentes que requieran su intervención.

Si la función de supervisión no está activa la máquina no podrá funcionar.

Las funciones autónomas se deberán abordar cuando se revise la norma EN ISO 4254-1.

3.3.4. Sistemas de mando

El sistema de mando de las máquinas móviles autónomas se diseñará para desempeñar por sí solo las funciones de seguridad, incluso en aquellas en las que las acciones se activen mediante una función de supervisión a distancia. Cuando se revise la norma se deberán tratar las funciones autónomas.

3.3.5. Puesta en marcha / Desplazamiento

El desplazamiento de las máquinas móviles autónomas tendrá en cuenta los riesgos relacionados con la zona de recorrido y funcionamiento prevista. Durante la revisión de la norma deberán tratarse las funciones autónomas.

3.3.6. Función de desplazamiento

Las máquinas móviles autónomas deberán contar con un sistema de protección periférico para delimitar su zona de desplazamiento y funcionamiento, que incluya resguardos o dispositivos de protección, o con dispositivos de detección de personas, animales domésticos u obstáculos, cuando estos puedan ocasionar un riesgo para su salud y seguridad o para el funcionamiento seguro de la máquina, o con ambos sistemas.

Los desplazamientos de las máquinas, incluidas las máquinas móviles autónomas, conectadas a uno o varios remolques o equipos remolcados, no deberán ocasionar riesgos para las personas, los animales domésticos ni cualquier otro obstáculo en su zona de peligro ni en la de sus remolques o equipos remolcados.

Las funciones autónomas se deberán tratar durante la revisión de la norma EN ISO 4254-1.

3.3.7. Fallo del circuito de mando

Las máquinas móviles autónomas deben estar diseñadas y fabricadas de forma que los fallos en el sistema de dirección no afecten a su seguridad. Las funciones autónomas deberán abordarse cuando se revise la norma.

3.4.8. Baterías

Las baterías con carga automática para máquinas móviles, incluidas las máquinas móviles autónomas, se diseñarán para prevenir los riesgos relacionados con las partes móviles y los de origen eléctrico, entre ellos los de contacto o colisión de la

máquina con una persona u otra máquina cuando se dirijan de forma autónoma a la estación de carga. Las funciones autónomas se deben abordar cuando se revise la norma.

3.4.9. Emisiones de sustancias peligrosas

Las máquinas móviles con personas a bordo cuya función principal sea la aplicación de sustancias peligrosas estarán equipadas con cabinas de filtrado o medidas de seguridad equivalentes. Este requisito no es pertinente en general para toda la maquinaria agrícola, por lo que deberá tratarse en la revisión de las partes específicas de la serie EN ISO 4254 para las que sea pertinente, tales como la parte 6, por ejemplo, sobre seguridad de los pulverizadores de productos fitosanitarios.

3.4.10. Riesgo de contacto con líneas eléctricas aéreas en tensión

Las máquinas móviles se deben diseñar, fabricar y equipar para evitar el riesgo de contacto con una línea eléctrica aérea activa o de crear un arco eléctrico entre cualquier elemento de la máquina o una persona operadora y una línea eléctrica aérea en tensión. Aunque este nuevo requisito está parcialmente cubierto, se tendrá en cuenta junto con la estructura de la serie EN ISO 4254 para determinar si se debe abordar en su totalidad en la parte 1 o es específico y debe tratarse en otras partes de la serie.

3.4.11. Vibraciones

La modificación de este RESS no afecta a la norma EN ISO 4254-1 por hacer referencia únicamente a los valores de las vibraciones transmitidas por la máquina al sistema mano-brazo, lo que únicamente aplicaría a las máquinas portátiles, que quedarían fuera del alcance de dicha norma, siendo, por tanto, no pertinente.

3.4.12. Máquinas o productos relacionados móviles autónomos

Las instrucciones de uso de las máquinas móviles autónomas deben especificar las características de sus zonas de recorrido y de funcionamiento previstas y de las zonas peligrosas. Se deben abordar las funciones autónomas durante la revisión de la norma.

3.5. Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para neutralizar los riesgos derivados de las operaciones de elevación

3.5.1. Resistencia mecánica

La modificación de este RESS no afecta a la norma EN ISO 4254-1, por ser aplicable a las máquinas utilizadas para operaciones de elevación, tales como grúas, por ejemplo.

3.6. Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para las máquinas o los productos relacionados que presenten riesgos particulares debidos a la elevación de personas

3.6.1. Dispositivos de mando

Este requisito modificado resulta de aplicación a las máquinas para la elevación de personas, por lo que queda fuera del alcance de la norma EN ISO 4254-1.

4. Conclusiones

Este análisis ha servido para detectar las mejoras que deben considerarse en la futura revisión de la norma armonizada EN ISO 4254-1 con el fin de que cubra en su totalidad los RESS del Reglamento (UE) 2023/1230. En concreto, se han detectado aspectos que es necesario revisar relativos a la ergonomía, el riesgo de vuelco o inclinación en los equipos de trabajo móviles con estructura de protección y sistema de retención, el riesgo de contacto con líneas eléctricas aéreas en tensión, la ciberseguridad, las aplicaciones colaborativas, la inteligencia artificial utilizada en las funciones de seguridad, el rescate de personas, entre otros.

Destacan igualmente varias cuestiones en relación con las máquinas autónomas, tales como la función de supervisión, las funciones de seguridad en esas máquinas, los sistemas de protección periféricos, los dispositivos de detección de personas, animales domésticos u obstáculos, etc.

Apéndice A

Tabla 1. Nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad relativos al diseño y la fabricación de las máquinas o los productos relacionados.

Nuevos o modificados RESS del Reglamento (UE) 2023/1230		**Pertinente**	**Cubierto**	**Apartados EN ISO 4254-1**
1	*Requisitos esenciales de salud y seguridad*			
1.1	Generalidades			
1.1.2	Principios de integración de la seguridad	Sí	Sí	4.6; 5.1.7; 5.1.8; 7; 8.2
1.1.6	Ergonomía	Sí	Sí	4.1; 4.5; 4.7; 4.8; 4.9; 4.11; 4.15; 4.16; 4.17; 5.1.7; 5.2; 5.3; 5.5 (f & g no pertinentes)
1.1.9	Protección contra la corrupción	Sí	No	-
1.2	Sistemas de mando			
1.2.1.	Seguridad y fiabilidad de los sistemas de mando	Sí	Sí	4.20
1.2.6.	Fallo de la alimentación de energía o de la conexión a la red de comunicación	Sí	Sí	4.1; 4.6; 4.12; 4.13; 4.20; 5.1.8
1.3	Medidas de protección contra riesgos mecánicos			
1.3.7	Riesgos relacionados con las partes móviles	No	-	-
1.6	Mantenimiento			
1.6.2	Acceso a los puestos de trabajo o a los puntos de intervención	Sí	Sí	4.7.1; 4.8; 4.11; 4.15; 5.1.1; 5.3; 8.2
1.7	Información			
1.7.4.2	Contenido de las instrucciones de uso	Sí	Sí	8.2; 8.3

Tabla 2. Nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad relativos al diseño y la fabricación de las máquinas o los productos relacionados.

Nuevos o modificados RESS del Reglamento (UE) 2023/1230		**Pertinente**	**Cubierto**	**Apartados EN ISO 4254-1**
2	*Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para algunas categorías de máquinas y productos relacionados*			
2.1	Máquinas y productos relacionados destinados a los productos alimenticios y máquinas y productos relacionados destinados a los productos cosméticos o farmacéuticos			
2.1.1	Generalidades	No	-	-
2.2	Máquinas portátiles o guiadas a mano o productos relacionados			
2.2.1.	Generalidades	No	-	-
2.2.1.1	Instrucciones de uso	No	-	-

Tabla 3. Nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para neutralizar los riesgos debidos a la movilidad de las máquinas o los productos relacionados.

Nuevos o modificados RESS del Reglamento (UE) 2023/1230		**Pertinente**	**Cubierto**	**Apartados EN ISO 4254-1**
3	*Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para neutralizar los riesgos debidos a la movilidad de las máquinas o los productos relacionados*			
3.1	Generalidades			
3.1.1	Definiciones	Sí	No	-
3.2	Puestos de trabajo			
3.2.2.	Asientos	Sí	Sí	5.1.2, 5.7 El peligro de vuelco o inclinación debe determinarse conforme a EN ISO 16231-1 y 2 [9-10]
3.2.4	Función de supervisión	Sí	No	-
3.3.	Sistemas de mando	Sí	No	-
3.3.2.	Puesta en marcha/desplazamiento	Sí	No	-
3.3.3.	Función de desplazamiento	Sí	No	-
3.3.5.	Fallo del circuito de mando	Sí	No	-
3.5	Medidas de protección contra otros riesgos			
3.5.1.	Baterías	Sí	No	-
3.5.3.	Emisiones de sustancias peligrosas	No	-	-
3.5.4	Riesgo de contacto con líneas eléctricas aéreas	Sí	Sí	5.1.7, 8.2.3 p); 8.3.4
3.6	Información e indicaciones			
3.6.3	Instrucciones de uso			
3.6.3.1	Vibraciones	No	-	-
3.6.3.3	Máquinas o productos relacionados móviles autónomos	Sí	No	-

Tabla 4. Nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para neutralizar los riesgos derivados de las operaciones de elevación.

Nuevos o modificados RESS del Reglamento (UE) 2023/1230		**Pertinente**	**Cubierto**	**Apartados EN ISO 4254-1**
4	*Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para neutralizar los riesgos derivados de las operaciones de elevación*			
4.1	Generalidades			
4.1.2	Medidas de protección contra riesgos mecánicos			
4.1.2.3	Resistencia mecánica	No	-	-

Tabla 5. Nuevos requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para las máquinas o los productos relacionados que presenten riesgos particulares debidos a la elevación de personas.

Nuevos o modificados RESS del Reglamento (UE) 2023/1230		**Pertinente**	**Cubierto**	**Apartados EN ISO 4254-1**
6	*Requisitos esenciales de salud y seguridad complementarios para las máquinas o los productos relacionados que presenten riesgos particulares debidos a la elevación de personas*			
6.2	Dispositivos de mando	No	-	-

Referencias

1. Reglamento (UE) 2023/1230 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio de 2023, relativo a las máquinas, y por el que se derogan la Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y la Directiva 73/361/CEE del Consejo.
2. Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE (refundición).
3. EN ISO 4254-1:2015 - Agricultural machinery - Safety - Part 1: General requirements.
4. EN ISO 4254-1:2015/A1:2021 - Agricultural machinery - Safety - Part 1: General requirements - Amendment 1.
5. EN ISO 24882 - Agricultural Machinery and Tractors - Cybersecurity Engineering.
6. EN ISO 18497-1:2024 - Agricultural machinery and tractors - Safety of highly automated agricultural machines - Principles for design.
7. EN ISO 18497-2:2024, Agricultural machinery and tractors — Safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery — Part 2: Design principles for obstacle protective systems.
8. EN ISO 18497-3:2024, Agricultural machinery and tractors — Safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery — Part 3: Autonomous operating zones.
9. EN ISO 16231-1:2013 - Self-propelled agricultural machinery - Assessment of stability - Part 1: Principles.

10. EN ISO 16231-2:2015 - Self-propelled agricultural machinery. Assessment of stability - Part 2: Determination of static stability and test procedures.

Estudo comparativo da eficiência energética em operações mecanizadas na instalação de culturas anuais

João Ramos [1] e Luís Alcino da Conceição [2]

[1] Instituto Politécnico Portalegre; joaoramos1999@gmail.com

[2] VALORIZA-Research Center for Endogenous Resource Valorization, Polytechnic Institute of Portalegre,7300-110 Portalegre; luis_conceicao@ipportalegre.pt

Resumo: Na atividade agrícola o consumo de combustível na realização de operações mecanizadas constitui uma base importante na avaliação da eficiência de produção do fator máquina. Este ensaio foi realizado numa parcela com 4 ha na Herdade Experimental da Comenda - INIAV Elvas. Foi feita a recolha (por telemetria) e a comparação os dados de consumo de combustível, velocidade de trabalho, velocidade de rotação do motor e binário e de performance pela capacidade efetiva de campo (CEF) e consumo por área. Existiram três itinerários técnicos de instalação de culturas anuais – sementeira direta (SD), mobilização mínima (MM) e mobilização convencional (MC). Os resultados mostram um ganho de eficiência energética tanto pela CEF como pelo consumo do itinerário de SD com diferenças significativas para ambos os itinerários de MM e MC. Ao preço de 1,267 euros por litro de combustível, a diferença de um itinerário para os demais é de 24,02 €/ha em SD para 62,78 €/ha em MM e 113,27 €/ha em MC. Estes resultados demonstram a importância que pode ter a opção de itinerários técnicos com redução das operações de mobilização do solo na conta de cultura e desta forma na maximização da eficiência de utilização de energia em operações mecanizadas.

Palavras-Chave: Mecanização, Custos de operação, Impacto ambiental, Telemetria

1. Introdução

A União Europeia tem hoje um importante objetivo no que respeita ao consumo de energia que se prende com a sua redução de 38 % na energia primária, e 40,5 % na energia final consumida até 2030 [1]. A adoção de práticas de uso eficiente de energia é assim uma meta da União Europeia, nomeadamente e também no setor agrícola onde se verificou um aumento significativo do consumo, fruto da intensificação da mecanização agrícola e dos combustíveis fósseis associados [2].

Cerca de metade da energia consumida no setor agrícola resulta de forma direta, da utilização de combustível, e a outra metade da energia necessária, para a produção de adubos azotados e outros fatores de produção [3]. Nas culturas anuais de sequeiro o principal fator de consumo de energia reparte-se entre as operações de instalação da cultura e as operações de colheita, em que o trator agrícola, e a

forma como o trator é utilizado são os principais fatores a ter em consideração [4]. Importa, por isso, arranjar alternativas para a realização das tarefas agrícolas de forma mais eficiente no consumo de energia, com menos pegada de carbono e ao mesmo tempo com menores custos para o agricultor [5].

Uma das opções prende-se com a necessidade de utilizar máquinas e tratores tecnologicamente adequados às operações a realizar e às máquinas operadoras com que trabalham, e a outra alternativa está na escolha das combinações das operações mecanizadas que podem levar à instalação da cultura de forma energeticamente mais eficiente [6].

Em Portugal, no que respeita ao trator refere-se a importância da atualização do parque de tratores que se mostra em muitos casos obsoleto, ultrapassando em larga escala a vida útil destes veículos, e o uso de práticas agrícolas sustentáveis alternativas às convencionais que passam pelo uso de sistemas e técnicas de agricultura de conservação [7].

1.1. Itinerários técnicos na instalação de culturas anuais

O planeamento e a execução de itinerários técnicos na instalação de culturas agrícolas são fundamentais para o sucesso da produção agrícola. Os trabalhos que se realizam no solo arável com o objetivo de vir a proporcionar as melhores condições de desenvolvimento às plantas quer venham a ser semeadas ou plantadas, constituem aquilo a que se chama de operações de preparação do terreno para a sementeira ou plantação, e constituem a base destes itinerários [8]. O solo é a componente base destes itinerários, cujo bom trabalho nele realizado pode garantir desde logo a produtividade desejada da cultura, mas também a conservação da biodiversidade, retenção de carbono e tantos outros serviços de ecossistemas importantes ao meio ambiente [9].

Como refere [10], retirado de Miedema (1997), o solo constitui um conjunto de fatores que determinam a performance da implementação e desenvolvimento vegetal de uma cultura, com elementos que passam para além dos processos físico-químicos, e atividade biológica do solo, mas também pela gestão de como as operações são realizadas, desde a mobilização de solo, à fertilização, aos tratamentos fitofarmacêuticos, à rega ou às intervenções de drenagem. Na instalação das culturas, a mobilização do solo é realizada com o objetivo de melhorar as suas condições de estrutura, garantir uma boa cama de sementeira e consequentemente uma boa taxa de germinação e emergência, enraizamento, bem como o seu desenvolvimento até à colheita. Para manter favorável as características e propriedades do solo, os equipamentos utilizados na preparação da cama de sementeira devem ser tidos em consideração, de entre as várias opções que hoje

estão ao dispor do agricultor tendo sempre em atenção o custo-benefício da sua utilização do ponto de vista técnico e ambiental [11].

De entre as várias operações de mobilização e máquinas operadoras que as podem realizar, são frequentes as operações de preparação inicial do solo caracterizadas pelo reviramento da leiva – lavoura, realizadas com charrua de aivecas ou discos, e as operações de mobilização vertical sem reviramento da leiva como as realizadas por máquinas de dentes, de que são exemplos os escarificadores pesados.

Terminadas as operações de mobilização do solo, os itinerários de instalação de culturas completam-se com a realização de operações de sementeira e fertilização, e nalguns casos de aplicação de produtos fitofarmacêuticos, nomeadamente no controlo de infestantes. A sementeira e fertilização podem realizar-se em conjunto quando a opção é o uso de semeadores em linhas, ou em operações separadas quando a opção é o uso de distribuidores centrífugos, nestes casos havendo a necessidade de uma nova passagem de uma máquina de mobilização para localização dos produtos em profundidade. O tipo de máquinas operadoras utilizadas e até a sequência das operações realizadas determina o tipo de itinerário escolhido.

1.1.1. Sistemas de mobilização convencional (MC)

Segundo [12], citam Bauemer e Bakermans (1973), a mobilização convencional (MC) do solo, constitui um sistema tradicional de mobilização, composta por uma operação primaria profunda com reviramento de leiva, à qual se seguem operações secundarias para a preparação da sementeira. Este sistema de mobilização, assenta inicialmente na utilização de uma charrua, seguida de um conjunto de máquinas que destorroam, fragmentam e nivelam o solo para formarem uma adequada cama de sementeira.

A utilização da charrua é benéfica quando se está na presença de solos coesos e argilosos, que tem tendência para abater, ficando com estrutura altamente compacta, diminuindo o arejamento, reduzindo a permeabilidade e colocando as plantas com défice hídrico. Outra vantagem é quando a lavoura profunda, feita no verão pode contribuir para a infiltração de água no inverno, aumentando assim o armazenamento de água no solo, aumentando a temperatura do solo, permitindo melhores condições para a emergência e o desenvolvimento da cultura. Por outro lado, torna-se uma operação muito dispendiosa devido à energia exigida, ao desgaste do material e à eficiência de utilização em campo. [8]

1.1.2. Sistemas de mobilização de conservação

A elevada necessidade de redução de custos nas explorações e na atividade agrícola, associada aos elevados problemas na conservação dos recursos naturais, levaram ao desenvolvimento de tecnologias alternativas de mobilização de solos. A agricultura de conservação (AC) tem um papel fundamental para a manutenção da sustentabilidade do solo, consiste na diminuição da intensidade ou até mesmo a eliminação da mobilização [13]. A AC inclui técnicas como a sementeira direta, mobilização na linha e a mobilização mínima. A superfície do solo deve estar protegida com restolhos em mais de 30 % após a sementeira, no que devem ser feitas menos operações mecanizadas (menor número de passagens, menos quantidade de solo mobilizado), assim como eliminação da prática da queima dos restolhos. Através da eliminação da operação de lavoura, nestes sistemas de mobilização ganham-se dias disponíveis de operação, aumentando a eficiência de utilização das máquinas associadas ao sistema, ao mesmo tempo que se reduzem os custos inerentes à exigência de tração e combustível [14].

1.1.2.1. Técnicas de mobilização mínima (MM)

A mobilização mínima engloba um conjunto de práticas de trabalho mais sustentáveis que protegem o solo e melhoram as suas características. O sistema de mobilização mínima tem por base a utilização de máquinas operadoras de mobilização com órgãos ativos na vertical. Podendo trabalhar a profundidades variáveis desde a superfície (vibrocultor), até uma maior profundidade (subsolador). Isto, garantindo sempre a quantidade de resíduos à superfície do solo da cultura anterior, com o objetivo de proteger o solo contra a erosão, e às alterações de temperatura [15]. Neste sistema a grade de discos é utilizada em situações excecionais, por ser uma máquina operadora com corpos ativos que provocam o reviramento parcial do solo. Apenas é utilizada quando não é permitida a operacionalidade de máquinas com órgãos verticais ativos, devido a uma elevada quantidade de infestantes, ou por uma elevada quantidade de afloramentos rochosos no solo [13].

1.1.2.2. Técnicas de mobilização na linha

A mobilização na linha, aplica-se a culturas com entrelinha larga, como por exemplo o milho, a soja e o girassol [15]. É uma técnica menos intensa para o solo, e o número de operações realizadas é mais reduzido, comparando com as técnicas referidas anteriormente. Podendo considerar-se a técnica intermedia entre a MM e a SD. Onde apenas se mobiliza a faixa onde se semeia. Esta operação pode ser realizada em simultâneo com o semeador em linha ou previamente feita antes da sementeira. A operação é feita por máquinas com órgãos ativos na vertical (escarificador ou

subsolador), que permitem descompactar o solo em profundidade na linha onde ficam instaladas as plantas, garantindo assim à superfície uma quantidade significativa de resíduos da cultura anterior [16].

1.1.2.3. Técnicas de sementeira direta (SD)

Nesta técnica de sementeira utiliza-se um semeador específico, e não é exercida qualquer mobilização prévia do solo, apenas é aberto o sulco onde é introduzida a semente a uma profundidade ideal para a germinação e emergência das plântulas sobre os resíduos inertes da cultura anterior. Antecedente à sementeira é realizada a monda química, visto que não há contacto com o solo para controlo das infestantes [17].

A prática desta técnica ao longo do tempo, tem como vantagens a acumulação de matéria orgânica na camada mais superficial do solo, uma rede de microporos e macroporos, resultantes da atividade dos microrganismos e do desenvolvimento das raízes, maior arejamento, maior capacidade de infiltração e retenção de água e nutrientes. Os solos mais adaptados para a SD, são os de textura mediana bem estruturados e que abrem fendas nos períodos mais secos [18].

1.2. Energia e eficiência energética

A energia relaciona-se com o ambiente, podendo-se considerar que altera o clima (alterações climáticas). No que ressalta as altas taxas de emissões de gases com efeitos de estufa (GEE), emitidos pelas diferentes formas de produção de energia. As explorações agrícolas dependem atualmente de duas fontes de energia: elétrica e térmica. A energia elétrica é fornecida pela rede pública ou por painéis solares, e é utilizada em equipamentos auxiliares, iluminação, bombas de água, armazéns, processadores, etc... A energia térmica é obtida através da combustão, e é utilizada para acionar componentes, nomeadamente motores de combustão interna (tratores agrícolas). A grande maioria das operações agrícolas mecanizadas, são executadas por máquinas de combustão interna, alimentadas a diesel. Podendo-se afirmar que a energia térmica é a mais utilizada na agricultura atualmente [19].

As operações culturais, tais como a preparação de solo consomem cerca de 55-65 % de energia. Novas técnicas como a MM e a SD, visam consumos de energia mais baixos, podendo ajudar a reduzir as emissões com efeito de estufa [20].

A eficiência energética é a relação de esforços para reduzir a quantidade de energia utilizada para garantir um produto ou serviço, contribuindo para uma redução de GEE. Considerando o consumo de gasóleo, os coeficientes de consumo de combustíveis são estimados com a quantidade de litros gastos e o tempo de

trabalho da máquina operadora, no qual o valor para conversão de um litro de diesel em energia é de 35,86 MJ de energia [21].

1.3. Operacionalidade em máquinas agrícolas

A operacionalidade em máquinas agrícolas, estuda o desenvolvimento de técnicas de planeamento e execução das operações, prevendo obter o máximo rendimento de todos os recursos disponíveis com o menor desperdício. Para se realizarem as operações, é feita a caracterização da forma como vão ser executadas, a ordem pelas quais vão ser realizadas, as condições meteorológicas previstas, as caraterísticas do solo, assim como as máquinas operadoras necessárias, para que possam desenvolver as operações num determinado tempo disponível [22]. A correta operacionalidade das máquinas agrícolas é fundamental, para a máxima eficiência do sistema de produção e ganho dos agricultores [23].

Nos sistemas atuais existe uma tendência para se recorrer a técnicas de mobilização de conservação, com forte impacto na SD, com o benefício da redução do número de operações e consequentemente contribuir para a redução do custo de instalação das culturas. A técnica da SD requer menor potência por parte da máquina operadora quando comparado com outras técnicas de sementeira, assim como de mão-de-obra disponível e o consumo de combustível por unidade de área [24].

2. Materiais e Métodos

2.1. Localização do ensaio

O estudo foi realizado numa parcela retangular com 40000 $m^{2,}$ na Herdade experimental da Comenda, do polo de inovação do INIAV Elvas, coordenadas geográficas (38.89456091805364, - 7.055714443574695). É uma parcela de sequeiro em pousio, sem árvores ou qualquer tipo de afloramentos rochosos.

2.1.2. Solo

O solo da parcela, está identificado na carta de solos nº37ª, podendo-se observar que a parcela é composta por dois tipos de solos diferentes (Pag e Sr). Sendo que os solos Pag, têm na sua composição Argiluviados Pouco Insaturados – Solos Mediterrâneos, Pardos, de Materiais Não Calcários, Para-Solos Hidromórficos, de arenitos ou conglomerados argilosos ou argilas (de textura arenosa ou franco-arenosa) e os solos Sr são solos Argiluviados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Não Calcários, Normais de arenitos [25].

No solo com a designação Pag, o Horizonte A1 varia entre os 20 - 30 cm, com tons cinzentos-claros, arenosos a franco arenoso, com ou sem elementos grosseiros, sem agregados, com valores de pH 5,0 a 6,0. O horizonte B de 20 - 60 cm é caracterizado por ser composto por algumas partículas de argila, tornando uma estrutura primária grosseira fraca e maciça, aderente, plástica e muito compacto, ficando extremamente rijo. O solo com caracterização Sr, no seu Horizonte A1 que vai desde os 15 - 25 cm, com as suas cores castanho avermelhado ou pardo avermelhado, tem na sua constituição alguns elementos grosseiros, estrutura fina moderada ou até franca, pH 5,0 – 6,0, posteriormente tem o Horizonte B com 20 - 50 cm, mantendo as cores, mas um pouco mais avermelhadas, devido a um aumento da percentagem de argila, mantendo também alguns elementos grosseiros, pH 5,5 – 7,0 [26].

No dia da instalação do ensaio foram avaliadas algumas características físicas do solo da parcela, devido ao pastoreio ali praticado, que é altamente proporcional para uma elevada compactação. Foi utilizado um penetrómetro de cone da marca Dickey John para se verificar os valores de compactação do solo, com o qual se teve por amostragem 40 pontos, e se registaram valores homogéneos em toda a parcela (300 psi).

A caracterização sumária do solo foi feita com a análise do solo no laboratório da ESAE, onde se determinou a textura (média), humidade do solo (10,1 %) e o teor de matéria orgânica (1,4 %). Foi levantada uma amostra de solo, com base em cinco subamostras por hectare, num total de 20 subamostras para a área em estudo. A técnica da marcação dos pontos para a retirada das subamostras, foi feita em zig-zag, utilizando-se uma sonda de meia cana batida com o martelo até à profundidade de 40 cm (profundidade máxima de mobilização do ensaio).

2.1.3. Clima

Segundo a classificação de Koppen, o clima na Herdade da Comenda é Csa, onde os verões são quentes e secos e no inverno a temperatura é amena, logo podemos afirmar que é um clima mediterrânico. Esta classificação é feita com base nas temperaturas médias, na precipitação e evapotranspiração de cada região [27].

De acordo com o registo de dados da estação meteorológica do INIAV Elvas, no dia de realização do ensaio as condições meteorológicas caracterizaram-se por temperatura média de 7 °C, uma humidade relativa do ar de 77 %, e não ocorreu precipitação.

2.2. Máquinas Agrícolas

2.2.1 Trator Agrícola

No ensaio foi utilizado um trator da marca New Holland, modelo T5, versão 120 matriculado no ano 2021. É um trator convencional, com 4 rodas motrizes, que está equipado com um motor em linha de 4 cilindros, montado da forma longitudinal com tecnologia Comact ECOBlue HI-eSRC 2 para estar em conformidade com a norma de emissões de partículas por motores agrícolas Stage V. O motor tem uma potência nominal de 86 KW (117 cv), transmissão robotizada "Dynamic Command" conferindo uma velocidade máxima de avanço em estrada de 40 km/h. Nesta versão a telemática do trator equipa um recetor de GNSS, dois terminais virtuais para carregamento e visualização de dados, linha ISOBUS e auto guiamento integrado.

2.2.2. Máquinas Operadoras

2.2.2.1 Charrua

Charrua de aivecas de reversão hidráulica a 180º de três ferros de 12" da marca Galucho, modelo CH3-12H, montada nos três pontos hidráulicos. De acordo com o fabricante faz uma largura de trabalho fixa de 91;44 cm e uma profundidade máxima de trabalho de 30 cm [28]. A operação desta máquina uma vez afinada nas barras de engate do trator é feita com o comando de tração do sistema hidráulico do trator.

2.2.2.2 Grade de discos

Grade de discos pesada (86 kg/disco), marca Galucho, modelo GLHR-28-26 (28 discos e 26") de abertura hidráulica em "of set" / V, com rodas ao centro do chassis, acoplada ao trator da forma rebocada. A máquina trabalha com dois conjuntos de saídas hidráulicas externas com duplo efeito, sendo uma para o kit de rodas e outra para a abertura e fecho dos corpos. No chassis assentam dois corpos, cada um desses corpos é equipado com 4 chumaceiras, e veios de 40 mm onde vão entrar os discos e os espaçadores. De acordo com o fabricante a grade realiza uma largura máxima de trabalho de 3,15 m [29].

2.2.2.3 Escarificador pesado "Chisel"

No ensaio utilizou-se uma máquina da marca Zarurca, modelo CH 9 3, é acoplado ao trator da forma montada aos três pondos do sistema hidráulico. É composto por três linhas, de três braços cada uma delas (9 braços), fazendo uma largura de trabalho de 3 m. Braço de 40 x 40, equipado com o sistema de segurança "non-stop" garantido por uma mola simples de compressão com afinador de tensão. Na base

do braço, está montado um bico de gume reversível podendo ser utilizado de ambos os lados. A profundidade de trabalho pode variar entre os 30 - 40 cm, e um desafogo ao solo de 70 cm [30].

2.2.2.4. Pulverizador

Utilizou-se um pulverizador de jato projetado da marca Amazone, modelo UF 901, acoplado ao trator de forma montada aos 3 pontos das barras de engate do sistema hidráulico. A máquina é equipada com dois distribuidores hidráulicos e uma linha ISOBUS. O funcionamento hidráulico permite a abertura e fecho da rampa de pulverização e nivelamento nos planos horizontal e vertical. A rampa aberta compreende uma largura de trabalho de 15 m, estando equipada com um porta bicos com três tipos de bicos de diferentes débitos.

A rampa está dividida em cinco setores comandados por electroválvulas independentes. O pulverizador é equipado com três depósitos: o depósito da calda (capacidade de 900 L), o depósito de autolimpeza (capacidade de 150 L) e um depósito incorporador de produtos fitofarmacêuticos.

2.2.2.5. Distribuidor centrifugo

Distribuidor centrifugo Amazone ZA-V 4200, é acoplado da forma montada nos três pontos de engate do trator no sistema hidráulico, com ligação ao veio da tomada de força do trator e regime nominal de funcionamento de 540 r.p.m. À semelhança do pulverizador, esta máquina também está equipada com a linha ISOBUS para compatibilidade de transporte de dados com o trator. A tremonha tem uma capacidade de carga de 4500 kg, estando equipada por um conjunto de sensores de massa que em trabalho permitem conhecer em qualquer momento a quantidade de carga transportada. A distribuição é realizada por dois discos do tipo V-3, fazendo uma largura de trabalho de 24 até 36 m.

2.2.2.6. Semeador

Semeador mecânico em linhas de chassis fixo, de fluxo continuo para SD com disco simples e recortado, da marca Gaspardo, modelo DIRETTA. É acoplado ao trator da forma semi-rebocado em transporte e rebocado em trabalho, funções comandadas por dois distribuidores hidráulicos de duplo efeito. A largura de trabalho é de 3 m, distribuída por 17 linhas, com uma largura entre linhas de 18 cm, e a tremonha tem a capacidade para 2090 L, conferindo-lhe um peso total de 4085 kg. O elevado peso, e os ajustes feitos pela mola de orientação do disco dentado, com diâmetro de 475 mm e 6 mm espessura, e a roda de compactação em ferro fundido, permite que exerça uma pressão máxima sobre o solo de 260 kg [31].

2.3. Delineamento Experimental

2.3.1. Itinerários x traçados de trabalho

O ensaio experimental aborda três tipos de itinerários culturais para a instalação de culturas anuais: Sementeira direta (SD), Mobilização mínima (MM) e Mobilização convencional (MC). Devido às características da parcela, um elevado número de infestantes, foi necessário utilizar a grade de discos no itinerário MM. Cada itinerário contempla diversos traçados de trabalho com grupos de máquinas e sequências de operações diferentes conforme mostra o (Quadro 1).

Quadro 1. Itinerário cultural /Máquina Operadora.

Itinerário cultural/Máquina operadora		
Sementeira Direta	**Mobilização Mínima**	**Mobilização Convencional**
Pulverizador	Grade de Discos 1	Charrua
Distribuidor Centrífugo	Chisel	Grade de discos
Semeador	Grade de Discos 2	Semeador
	Distribuidor Centrífugo	
	Semeador	

Atendendo às características da parcela com a área total de 4 hectares, realizaram-se traçados de trabalho retilíneos, tendo a parcela sido dividida em três subparcelas com a mesma área (1,33 ha), onde em cada uma delas foi implementado um itinerário cultural (SD, MM, MC). Para maior facilidade do tratamento estatístico, cada subparcela foi dividida em quatro blocos com uma área aproximada de 0,33 hectares cada um.

2.3.1.1 Sementeira Direta (SD)

O primeiro itinerário cultural realizado, foi a prática da sementeira direta, não houve reviramento do solo, e foram abordados o mínimo de traçados de trabalho (três). Inicialmente foi utilizado o pulverizador de jato projetado, posteriormente o distribuidor centrifugo e no final o semeador de sementeira direta.

2.3.1.2 Mobilização Mínima (MM)

A mobilização mínima, foi o segundo itinerário cultural realizado. No decorrer do ensaio foram realizadas cinco operações, grade de discos, escarificador pesado - chisel para descompactar o solo, segunda passagem com a grade de discos, distribuição de adubo com o distribuidor centrífugo e sementeira com o semeador em linha.

2.3.1.3 Mobilização Convencional (MC)

A mobilização convencional foi o terceiro itinerário a ser posto em prática. Realizaram-se três operações, começando pela charrua de aivecas, a qual faz o reviramento do solo, seguida de uma passagem com grade de discos e posteriormente a sementeira com o semeador em linha.

2.3.2. Operação das máquinas e gravação dos dados

Todas as operações de cada itinerário foram realizadas por um operador profissional, o qual realizou os ensaios, como se estivesse a trabalhar no seu dia a dia no campo, sem influenciar a velocidade, rotação ou outros parâmetros considerados pertinentes na realização das operações.

A gravação dos dados de performance das operações realizou-se com a colaboração da CNH Portugal/New Holland Portugal que disponibilizou assistência técnica e software NH para gestão de informação e diagnostico eletrónico dos conjuntos trator/máquina operadora. A parametrização feita permitiu o registo de dados ao longo dos traçados de trabalho, a cada 0,05 segundos (20 dados por segundo), dos parâmetros velocidade de deslocação do trator (km/h), velocidade do motor (r.p.m.), quantidade de combustível (l/h) e binário (%).

2.4. Análise e Tratamento Estatístico dos dados

Os dados obtidos foram sujeitos a analise da estatística descritiva dos parâmetros por operação e análise de variância com teste de Tukey para comparação de médias por itinerário técnico. Para esta análise recorreu-se ao software Excel da Microsoft e SPSS versão 27. No final apresenta-se uma abordagem de custos vs eficiência assente nos resultados da análise de variância por itinerário técnico.

3. Resultados

Em cada itinerário cultural, foram utilizados vários traçados de trabalho, com máquinas operadoras diferentes, utilizando-se o auxílio da condução autónoma, para não haver sobreposições entre passagens paralelas. Cada itinerário é constituído por quatro blocos, para que fosse possível a comparação entre eles.

Os quadros 2, 3 e 4 mostram a estatística descritiva através dos valores mínimos, máximos e médios assim como o desvio padrão para cada parâmetro observado - velocidade do motor, binário, consumo de combustível e velocidade das rodas, nos traçados de trabalho de cada itinerário cultural.

Está representado também a capacidade efetiva de campo (ha/h) para cada máquina operadora, com base no rendimento de campo tabelado por [32] e [33], em função das características da parcela, do operador e das condições do solo à data do ensaio. A capacidade efetiva de campo (CEF), é assim calculada através da Equação 1 [34].

$$CEF = \frac{área}{tempo} = \frac{l \times v \times \eta}{10} \qquad (1)$$

Onde:

l = largura da máquina operadora (m), v = velocidade de deslocação (km/h), η = rendimento de campo (%)

Equação 1. Cálculo da capacidade efetiva de campo (ha/h) [34]

Para se poder fazer a comparação do consumo de combustível e performance em diferentes operações mecanizadas na instalação de culturas agrícolas anuais, foi determinado o débito (L/ha). Posteriormente foi avaliada a eficiência energética entre diferentes itinerários e a quantidade de energia necessária para realizar cada itinerário cultural, sabendo-se que cada litro de diesel consumido, produz 35,86 MJ de energia [21]. Com o consumo de energia existe um impacto ambiental das emissões de GEE resultante da performance das diferentes operações, sabendo-se que cada litro de combustível consumido, liberta 2,6 kg de CO_2 [21].

Quadro 2. Dados do Itinerário Cultural (Sementeira Direta)

Itinerário Cultural	Traçado de trabalho	Parâmetros	V motor (r.p.m.)	Bin (%)	Débito (l/h)	V rodas (m/h)	CEF (ha/h)	Quant. Comb. (l/ha)	Energia (MJ/ha)	CO_2 (kg/ha)
Sementeira Direta	Pulverizador	Mínima	776,5	8	1,05	0,050	8,2	1,01	36,22	2,63
		Máxima	1611,5	84	17,8	8,000				
		Média	1435,4	30,8	8,22	6,800				
		DP	252,7	9,1	2,2	2,200				
	Distribuidor Centrífugo	Mínima	1503	9	4,8	0,920	17,8	0,54	19,36	1,40
		Máxima	1619,5	66	14,55	9,860				
		Média	1560,1	33,3	9,56	8,490				
		DP	17	7,5	1,4	2,300				
	Semeador	Mínima	1068,5	11	1,75	0,050	0,8	17,41	624,32	45,27
		Máxima	1884,5	71	17,25	4,09				
		Média	1831,3	31,1	14,49	3,700				
		DP	57,8	6,1	1,3	1				

O itinerário cultural da SD, permite um maior período disponível para ser realizada a sementeira, visto que o solo tem maior capacidade de resistência para suportar o peso das máquinas. Feita a avaliação geral na instalação de uma cultura em SD, são necessários 18,96 L de combustível para instalar um hectare de uma cultura anual. Consumindo assim 679,91 MJ de energia, com a emissão de 49,3 kg de CO_2.

Quadro 3 Dados do Itinerário Cultural (Mobilização Mínima)

Itinerário Cultural	Traçado de trabalho	Parâmetros	V motor (r.p.m.)	Bin (%)	Débito (l/h)	V rodas (m/h)	CEF (ha/h)	Quant. Comb. (l/ha)	Energia (MJ/ha)	CO_2 (kg/ha)
Mobilização Mínima	Grade de discos 1	Mínima	978	10	0,95	0,060	2,4	10,03	359,68	26,08
		Máxima	1910,5	91	25,65	9,440				
		Média	1735,6	70,5	23,8	8,370				
		DP	104,7	13,2	3,5	1,600				
	Chisel	Mínima	795	10	0,65	0,040	1,6	15,39	551,89	40,01
		Máxima	1938,5	95	25,78	7,920				
		Média	1591,1	73,5	24,98	6,010				
		DP	244,1	24,3	6,8	2,100				
	Grade de discos 2	Mínima	1247	10	0,75	0,390	2,4	8,41	301,58	21,87
		Máxima	2016	92	22,25	9,270				
		Média	1729,3	65,9	20,34	8,530				
		DP	109,8	11,4	3,2	1,100				
	Distribuidor centrifugo	Mínima	1164,5	10	4,35	0,370	20,1	0,64	22,95	1,66
		Máxima	1719	95	19,4	10,660				
		Média	1557,2	43,5	12,9	9,560				
		DP	89	8,3	1,5	1,200				
	Semeador	Mínima	1518	12	3,85	0,110	0,9	15,08	540,077	39,21
		Máxima	1710,5	66	15	4,690				
		Média	1654,9	37,4	13,78	4,060				
		DP	22,6	7,1	1,3	1,200				

No itinerário cultural da MM utiliza-se máquinas com corpos ativos na vertical de forma a garantir que alguns subprodutos fiquem à superfície do solo, provenientes da cultura anterior [15]. No ensaio realizado foi utilizada a grade de discos em trabalho muito superficial, excecionalmente usada quando existe um elevado número de subprodutos à superfície, permitindo que posteriormente possa trabalhar uma máquina com órgãos ativos verticais [13]. Devido à utilização da MM, são postos em prática cinco operações (Quadro 3).

Nestas opções é necessário um maior número de dias disponíveis para a realização das operações, comparado com o itinerário cultural de SD descrito anteriormente [35].

Avaliando todas as operações mecanizadas na realizadas na instalação da cultura anual, a mobilização mínima carece de uma quantidade de combustível significativa por hectare (49,55 L). Quando esse combustível é queimado, são gastos 1776,86 MJ de energia, como efeito secundários são produzidos 128,83 kg de CO_2.

Quadro 4. Dados do Itinerário Cultural (Mobilização Convencional)

Itinerário Cultural	Traçado de trabalho	Parâmetros	V motor (r.p.m.)	Bin (%)	Débito (l/h)	V rodas (m/h)	CEF (ha/h)	Quant. Comb. (l/ha)	Energia (MJ/ha)	CO_2 (kg/ha)
Mobilização Convencional	Charrua	Mínima	890,5	11	1	0,050	0,3	63,26	2268,50	164,48
		Máxima	2004	88	22,15	5,130				
		Média	1801,5	53,8	20,93	4,040				
		DP	177,2	14,3	4,2	0,700				
	Grade de discos	Mínima	1015	1	0,75	0,130	1,9	10,56	378,68	27,46
		Máxima	1869,5	95	22,5	7,680				
		Média	1741,5	65,1	20,12	6,720				
		DP	149,4	16	4,7	1,700				
	Semeador	Mínima	1000	11	1,8	5,130	0,9	15,6	559,42	40,56
		Máxima	1904,5	82	20,1	0,020				
		Média	1831,7	38,9	14,78	4,210				
		DP	93,6	9,9	2,2	1,300				

O itinerário cultural da MC é composto por uma sequência de operações (Quadro 4), que se inicia sempre por uma operação profunda com o reviramento da leiva, à qual se seguem operações secundarias mais superficiais para fazer a preparação da cama de sementeira [35] e posteriormente a sementeira com o semeador em linhas.

Feita a juncão de todas as operações realizadas dentro da MC para a instalação da cultura anual, é o itinerário que necessita de mais combustível (89,4 L). Quando esse combustível é queimado, são gastos 3206,6 MJ de energia, como efeito secundário são produzidos 232,49 kg de CO_2.

O Quadro 5 e 6 mostram os resultados da análise de variância do parâmetro consumo por hectare e do teste de comparação de médias, respetivamente.

Quadro 5. Valores da análise de variância obtidos por itinerário técnico para o consumo por hectare.

(I) Itinerário	(J) Itinerário	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
					Limite inferior	Limite superior
MC	MM	39,8464*	13,22769	0,035	2,9146	76,7782
	SD	70,4448*	13,22769	0,001	33,5130	107,3766
MM	MC	-39,8464*	13,22769	0,035	-76,7782	-2,9146
	SD	30,5984	13,22769	0,105	-6,3334	67,5302
SD	MC	-70,4448*	13,22769	0,001	-107,3766	-33,5130
	MM	-30,5984	13,22769	0,105	-67,5302	6,3334

Com base em médias observadas.
O termo de erro é Quadrado Médio (Erro) = 349,944.
*. A diferença média é significativa no nível 0,05.

Quadro 6. Teste de comparação de médias segundo o método de Tukey

Itinerário	N	Subconjunto	
		1	2
SD	4	18,9593	
MM	4	49,5577	
MC	4		89,4041
Sig.		0,105	1,000

A observação dos resultados mostra que existem diferenças significativas nas médias do IT de MC para MM e SD, e SD relativamente a MC. Por subconjuntos apenas o valor de MC se apresenta com diferenças significativas relativamente a MM e SD, ainda que seja evidente a diferença de valores de consumo de combustível entre SD e MM. Este facto resulta certamente do número de apenas termos 4 repetições.

O Quadro 7 e 8 mostram os resultados da análise de variância por itinerário técnico do parâmetro área por hora e do teste de comparação de médias, respetivamente.

Quadro 7. Valores da análise de variância obtidos por itinerário técnico para o parâmetro área por hora.

(I) Itinerário	(J) Itinerário	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
					Limite inferior	Limite superior
MC	MM	-24,2285*	2,43501	0,000	-31,0270	-17,4299
	SD	-23,6256*	2,43501	0,000	-30,4242	-16,8271
MM	MC	24,2285*	2,43501	0,000	17,4299	31,0270
	SD	0,6029	2,43501	0,967	-6,1957	7,4014
SD	MC	23,6256*	2,43501	0,000	16,8271	30,4242
	MM	-0,6029	2,43501	0,967	-7,4014	6,1957

Com base em médias observadas.
O termo de erro é Quadrado Médio (Erro) = 11,859.
* . A diferença média é significativa no nível 0,05.

Quadro 8. Teste de comparação de médias segundo o método de Tukey

Itinerário	N	Subconjunto	
		1	2
MC	4	3,1820	
SD	4		26,8076
MM	4		27,4140
Sig.		1,000	0,967

Para os dados de eficiência de campo os resultados mostram diferenças significativas entre o IT de MC com MM e SD, de MM com MC e de SD com MC. Por

subconjuntos é evidente tanto pelo teste realizado como pelos valores absolutos a diferença significativa da MC para SD e MM.

4. Discussão

As operações agrícolas realizadas dentro de uma exploração, tem por base dois pilares que influenciam a tomada de decisão, onde um deles é o necessário para se realizar as operações, e o outro é o custo que a operação irá ter. O sucesso das produções, é o efeito secundário de uma boa gestão de sequência de operações, sempre com um objetivo definido [36]. O processo de produção reúne vários fatores, tais como o solo, cultura, fatores meteorológicos, equipamentos e dias disponíveis, etc. Para se obter as produções previstas, devem ser tidos em conta vários itinerários culturais, e dentro de cada um deles uma ordenação de sequência de operações para serem atingidos os objetivos previstos [37].

Na avaliação do itinerário a ser colocado em prática, este pode ter um maior ou menor limiar de rentabilidade, dependendo dos equipamentos colocados em prática. Dependendo do objetivo de produção e das características do solo. No ensaio realizado, onde foram colocados em prática três itinerários diferentes para a implementação de uma cultura anual. Para as quais podemos fazer a comparação do consumo de energia e as emissões de CO_2 resultante das operações. Avaliando os dados totais por itinerário, a SD foi aquela que teve um menor consumo de energia (679,91 MJ/ha), para a implementação de uma cultura anual de outono / inverno, como efeito secundário houve um impacto ambiental de 49,3 kg/ha de CO_2. O itinerário da MM foi o segundo com maior consumo de energia, o que corresponde a 1776,86 MJ/ha, com essa necessidade foram emitidos 128,83 kg/ha de CO_2, em último e com um maior consumo de energia, o itinerário de MC, necessitou assim de 3206,60 MJ/ha de energia, resultante de 232,49 kg/ha de CO_2. Com base nos dados anteriormente apresentados, verifica-se que a SD necessita três vezes menos energia comparando com a MM, como também três vezes menos poluente que a MM. Comparando a SD com a MC, aquela é quatro vezes e meia menos consumidora de energia, assim como a sua poluição. Se for feita a comparação da MM com a MC, aquela necessita de quase metade da energia para implementar a mesma área de cultura, como efeito direto, a emissão de CO_2.

Em termos de custo de operação, foi tido como base o valor médio do combustível destinado ao setor agrícola à data de (30/12/2023), que correspondeu a 1,267 euros por litro [38]. Feita a comparação entre itinerários, pode-se assim verificar que implementar um hectare em SD (18,96 L), corresponde a 24,02 euros, em MM (49,55 L), com um custo de 62,78 euros e em MC (89,4 L), o custo é de 113,27 euros.

Cada agricultor utiliza o itinerário que pensa ser o mais rentável na sua exploração, dependendo sempre das culturas que implementa, e se essas conseguem ter produções (no caso da MM ou MC), para suportar os gastos em mecanização na implementação da cultura, comparando com a SD.

5. Conclusão

Neste trabalho, fez-se a abordagem entre o consumo de energia na atividade agrícola, especificamente na forma de combustível utilizado para operações mecanizadas. Essa análise é crucial para avaliar a eficiência da produção em termos de máquinas agrícolas, e a sua relevância varia conforme o tipo de operação realizada e o itinerário técnico de instalação de culturas.

Os resultados indicam um ganho significativo de eficiência energética no itinerário de SD, tanto em termos de CEF quanto de consumo de combustível, quando comparado aos itinerários de MM e MC. Esses resultados destacam a importância da escolha do itinerário técnico por parte do agricultor, e da opção que mais contribua para a redução das operações de mobilização do solo. Com base neste ensaio essa abordagem pode maximizar a eficiência na utilização de energia em operações mecanizadas, contribuindo para uma agricultura mais sustentável e económica.

Referências

1. Jagadale, M.; Shrivastava, P.; Paradkar, V.; Bijarniya, H.; Murthy, G.R.K. Farm Mechanization to Improve Energy Efficiency and Drudgery Reduction. *ICAR – National Academy of Agricultural Research Management (NAARM)* **2021**, pp. 307 – 332.
2. Matteo, C. Fichas temáticas sobre a União Europeia. Disponível online: https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/69/eficiencia-energetica. (Acedido em 06/07/2023).
3. Baptista, F.; Silva, L.; Murcho, D.; Louro, M.; Marques, C. Agricultura e Eficiência Energética – Projeto AGREE. Simpósio Agricultura, Energia e Ambiente, Portugal, 06/11/2013.
4. Márquez, L. A avaliação energética de um trator. *AGRIWORLD*. **SD** pp. 57-60. VER LINK
5. Frantz, U.; Schlosser, J.; Farias, M.; Ferigolo, L.; e Ebert, L.; Eficiência energética de um trator agrícola utilizando duas configurações de tomada de potência., *Ciência Rural,* **2014,** pp. 1219 - 1222. DOI: 10.1590/0103-8478cr20130175.
6. Silveira, G.; Sierra, J. Eficiência energética de tratores agrícolas fabricados no Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* **2010**, pp. 418 - 424. DOI: 10.1590/s1415-43662010000400011.
7. Produção Agrícola Sustentável. Disponível online: https://www.dgadr.gov.pt/19-modos-de-producao-sustentavel (acedido em 10/08/2023)
8. Viana, J.; Agricultura, D.S. Mobilização do Solo – Manual do formador. *DRADR Açores.* **2013**.
9. Santos, J. Uso do solo, Agricultura e Ambiente. *DRAPAL.* **2015**.
10. Palha, L. Mobilização profunda do solo como medida de redução da variabilidade espacial da produtividade na cultura do milho no vale do Tejo. *Lisboa: ISA*. **2018**. 93 p.
11. Filho, A.; Centurion, J.; Silva, R.; Angeli, F. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. *Engenharia Agrícola*. **2007**. DOI:10.1590/S0100-69162007000100017

12. Marques, F. Avaliação Técnica e Económica de Sistemas de Mobilização do Solo. *Évora: UE*. **2009**. 291 p.
13. Moreira, R. Sabe o que é a agricultura de conservação? *Agricultura e Mar.* **2018**. Disponível online: https://agriculturaemar.com/sabe-o-que-e-a-agricultura-de-conservacao/ (acedido em 06/07/2023).
14. Freixial, R. A AGRICULTURA É UMA ACTIVIDADE MULTI-FUNCIONAL. *Évora: UE*. **2010.** Disponível online: http://hdl.handle.net/10174/2357 (acedido em: 05/10/2023).
15. Barros, J.; Freixial, R. Agricultura de Conservação. *Évora: UE*. **2011**.
16. Übelhör, A.; Witte, I.; Billen, N.; Gruber, S.; Hermann, W.; Morhard J.; Claupein, W. Feasibility of strip-tillage for field grown vegetables*. Journal fur Kulturpflanzen*. **2014.** DOI: 10.5073/JfK.2014.11.01
17. Elsner, J. Direct Seeding as an Alternative Method to Planting for Woodland Creation in Iceland . *UNIVERSITY OF ICELAND*. **2022**. 71 p.
18. Barros, J.; Basch, G.; Carvalho, M. Sementeira Directa como Sistema de Mobilização de Conservação do Solo. *Évora: UE*. **2002.**
19. Marubayashi, R.Y. P.; Bruno, J.L.; Ralisch, R. As fontes de energia para as atividades na produção agrícola. *Portal Máquinas Agrícolas.* **2023.**
20. Enoque, E. Avaliação de Consumos Energéticos em Diferentes. *Évora: UE*. **2015.**
21. Matias, C. Avaliação da incorporação de biodiesel em gasóleo. *Leiria: IPL*. **2015**.
22. Ribeiro, D. Desempenho operacional e energético de um trator agrícola durante a operações de roçagem, aração e semeadura. *Rio de Janeiro: UENF*. **2011**.
23. Peça, J. Análise de aspectos de operacionalidade de máquinas agrícolas. *Évora: UE.* **2012.**
24. Zentner, R.; McConkey, B.; Stumborg, M.; Campbell, C.; Selles, F. Desempenho energético da gestão da lavoura de conservação para a produção de trigo de primavera na zona de solo marrom. **1997**. pp. 553-563,
25. DGADR. Nota Explicativa da Carta dos Solos de Portugal e da Carta de Capacidade de Uso do Solo. **2023.** Disponível online: https://www.dgadr.gov.pt/nota-explicativa. (Acedido em 02/07/2023).
26. Cardoso, J. Os solos de Portugal. *Lisboa: DGSA*. **1965.**
27. IPMA. Área educativa - CLIMA DE PORTUGAL CONTINENTAL. **2023.** Disponível online: https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/. (Acedido em 02/07/2023).
28. Galucho. Galucho máquinas para a vida. **2023.** Disponível online: https://galucho.pt/produto/ch3-h/. (Acedido em 12/05/2023).
29. Galucho. Grades GLHR. **2023.** Disponível online: https://galucho.pt/produto/glhr/. (Acedido em 05/06/2023).
30. Agrometal Marquez. Cultivadores Chisel. **2023.** Disponível online: https://agrometalmarquez.es/. (Acedido em 09/06/2023).
31. Gaspardo. Semeadora mecânica para semeadura direta. **2023**. Disponível online: https://www.maschiogaspardo.com/pt/web/portugal/diretta. (Acedido em 13/06/2023).
32. Beato, P. Definição e Otimização de Módulos de Mecanização na Cultura do Trigo (com base nos critérios técnico-económico, energético e carbónico. *Lisboa: ISA*. **2021**.
33. Canavate J. Ediciones Mundi-Prensa. *Las Máquinas Agricolas y Su Aplicacíon*. 6ªed. Madrid. **2012**.
34. Silva, L. Telemetria aplicada à gestão do parque de máquinas agrícola. *Elvas: ESAE.* **2021**.
35. Abelho, S. Optimização da gestão do parque de máquinas da sociedade agrícola do rabaço. *Elvas: ESAE*. **2009**.
36. Pinto, P. Operações agrícolas. *Lisboa: ISA.* **2010.** Disponível online: https://www.researchgate.net/publication/263847633_Operacoes_agricolas. (Acedido em 12/11/2023).
37. Silva, S. MÁQUINAS E MECANIZAÇÃO AGRÍCOLAS. *Cascavel*. **2005.**
38. DGEG. PREÇO MÉDIO DIÁRIO (CONTINENTE). Disponível online: https://precoscombustiveis.dgeg.gov.pt/estatistica/preco-medio-diario/. (Acedido em 30/12/2023).

Proposta de desenvolvimento de um microcontrolador de baixo custo para atualização de sistemas de comando de distribuidores de adubo de taxa variável: Estudo de caso

João Serrano [1,*], Alexandre Amaral [1] and Carlos Escribano [2]

[1] MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development, CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal; (J.S.) jmrs@uevora.pt; (A.A.) amrdamaral@gmail.com

[2] AAMSIbérica, Calle de los Alfareros, 4C, 28680 San Martin de Valdeiglesias, Spain; carlos.escribano@aams-iberica.com

* Correspondence: (J.S.) jmrs@uevora.pt;

Resumo: Nas últimas duas décadas foram adquiridos muitos equipamentos para responder aos desafios da Agricultura de Precisão (distribuidores de adubo, semeadores, pulverizadores, por exemplo). Estes são, em geral, caros, por se encontrarem equipados com tecnologias relativamente sofisticadas (sensores, atuadores e sistemas eletrónicos de informação e comando) com o objetivo de ajustar doses variáveis perante variações de velocidade do trator (sistemas de débito proporcional ao avanço, DPA) ou mesmo ajustar doses variáveis em função da localização espacial (sistemas VRT). Apesar de funcionais, tornaram-se, no entanto, obsoletos em termos de comunicação e incompatíveis com sistemas recentes de monitorização e controlo baseados no protocolo "ISOBUS". Este trabalho apresenta, num estudo de caso, uma solução de baixo custo desenvolvida para tornar compatível o sistema "Ferticontrol", sistema de comando do distribuidor centrífugo de adubo "Vicon RS-EDW", adquirido em 2004 como sistema de aplicação de taxa variável, com o sistema "InCommand" da "Ag Leader". A solução final incluiu um protocolo de mediação baseado em ferramentas de baixo custo microcontroladores e software de acesso aberto, "Arduino" e "Raspberry Pi". O desenvolvimento mostrou que é possível implementar uma solução acessível aos agricultores em geral, etapa fundamental para que as empresas agrícolas com menores recursos se mantenham tecnologicamente operacionais, garantindo um retorno económico que as mantenha competitivas e sustentáveis.

Palavras-chave: atualização e compatibilidade tecnológica; VRT; agricultura de precisão; comunicação entre software.

1. Introdução

A agricultura de precisão (AP) surgiu de uma necessidade urgente de transformação e modernização da agricultura e foi impulsionada por tecnologias emergentes. Este conceito revolucionou a gestão agrícola nas últimas décadas. O seu objetivo é tornar esta atividade mais produtiva e rentável, reduzindo o impacto ambiental, ajustando

os fatores de produção às necessidades de cada área de um campo [1]. O ciclo de AP pode ser resumido em três fases principais: (i) levantamento da variabilidade espacial do solo e das culturas; (ii) tratamento de dados e definição de zonas de gestão diferenciadas; (iii) tomada de decisões e implementação de uma gestão diferenciada do solo, das culturas e dos sistemas de produção. Nesta estrutura genérica, a aplicação a taxa variável (conhecida em língua inglesa por VRA – "Variable Rate Application") representa o fechar do ciclo, pelo que se enquadra na fase (iii) e é utilizada para diferentes fatores de produção, tais como sementes, fertilizantes, água ou produtos fitossanitários.

Os sistemas VRA utilizam tecnologia de taxa variável (conhecida em língua inglesa por VRT – "Variable Rate Technology") e estão atualmente disponíveis no mercado em dois formatos: baseado em mapas (VRT em pós-processamento), ou baseado em sensores (VRT em tempo real) [2]. A escolha entre estes sistemas depende principalmente do tipo de aplicação necessária, mas também da política de investimento e do nível de conhecimento técnico [3]. A capacidade de usar numerosas fontes de informação, a disponibilidade de sistemas de aplicação para a maioria dos fatores de produção e o intervalo de tempo entre a amostragem da variabilidade espacial e o momento de aplicação, são os principais benefícios do sistema baseado em mapas de prescrição (em pós-processamento). Por outro lado, os benefícios mais significativos dos sistemas baseados em sensores (em tempo real) incluem a possibilidade de alterar a taxa de aplicação sem ter que previamente mapear a área ou recolher dados de campo e a oportunidade de aplicação imediatamente após a medição pelos sensores [4]. No entanto, os métodos baseados em mapas podem ser considerados os mais comuns na abordagem VRT relacionada com a distribuição de adubos granulados [5].

Nos últimos anos muitos equipamentos agrícolas, nomeadamente distribuidores de adubo, semeadores ou pulverizadores, têm sido adquiridos no âmbito de projetos financiados por diversos programas de apoio à modernização da agricultura, com vista a responder aos desafios lançados pelo conceito de AP. Muitos destes equipamentos, apesar de terem 10-20 anos de utilização, estão operacionais e dispõem de sensores, atuadores e unidades eletrónicas de informação e comando. Dada a velocidade dos desenvolvimentos da mecatrónica e das tecnologias de informação, com o lançamento contínuo de inovações tecnológicas num mercado altamente competitivo como o das máquinas agrícolas, os equipamentos rapidamente se tornam obsoletos, especialmente ao nível dos protocolos de comunicação. Os modernos sistemas de controlo, baseados no protocolo "ISO bus", de compatibilização entre "hardwares" e "softwares" de diferentes fabricantes de tratores e alfaias agrícolas, não são, no entanto, compatíveis com estes equipamentos, tornando, por isso, tecnologicamente obsoletas alfaias que tiveram

um custo de aquisição muito significativo e que apresentam ainda um importante potencial de utilização. A proposta dos fabricantes para atualizar estas alfaias exige refazer quase na totalidade todo o sistema eletrónico, substituindo sensores, atuadores e a própria unidade de informação e controlo, o que implica custos elevados (superiores a uma dezena de milhares de euros).

Portanto, a adaptação e atualização de sistemas de controlo de baixo custo que mantenham ou proporcionem a possibilidade de operar em VRT representa um desafio de grande interesse que vem sendo assumido por diversas equipas de investigação em todo o Mundo. As soluções de baixo custo (atualização tecnológica) são particularmente importantes para os pequenos agricultores, que não conseguem fazer continuamente grandes investimentos em novas tecnologias. Fornecer a estes agricultores as ferramentas certas para mitigar a adversidade e obter maior controlo do processo de produção poderia desbloquear o seu potencial e apoiar as comunidades rurais para satisfazer a crescente procura global de alimentos [6].

Este trabalho apresenta a solução de baixo custo proposta por esta equipa, para tornar o sistema de comando original do distribuidor de adubo "Vicon RS-EDW" compatível com aplicação a taxa variável a partir do sistema de comando "Ag Leader", baseado em microcontroladores e software de código aberto.

2. Material e Métodos

2.1. Características do distribuidor de adubo Vicon RS-EDW

O distribuidor "Vicon RS-EDW" de dois discos (Figura 1a) foi adquirido pela Universidade de Évora em 2003. O equipamento recebe potência mecânica através da tomada de força do trator (ao regime normalizado de 540 rotações por minuto). O regime dos discos de distribuição do adubo é regulado numa caixa de transmissão por engrenagens. A combinação do regime dos discos, do ponto de queda do adubo nos discos e das caraterísticas do adubo (densidade e granulometria) permitem o ajustamento da largura de trabalho (L, em m), introduzida pelo operador no sistema eletrónico de monitorização e controlo do distribuidor (sistema "Ferticontrol").

O sistema eletrónico do referido distribuidor (Figura 1b) é constituído por um conjunto de 5 sensores eletrónicos na base da tremonha (quatro células de carga e um sensor de referência), que permitem a pesagem do adubo na tremonha em intervalos regulares (de meio em meio segundo). Esta informação, que traduz o caudal de adubo aplicado (Q, in kg h^{-1}) é fornecida ao microprocessador, o qual também recebe a informação da velocidade de trabalho (v, in km h^{-1}; pode ser

obtida por um radar ou por um sensor magnético de proximidade). Com esta informação o microprocessador calcula a capacidade de trabalho (Ct, in ha h^{-1}; equação 1) e a densidade de aplicação de adubo por hectare (D_a, in kg ha^{-1}; equação 2).

$$Ct\ (ha/h) = v\ \times L \times 0.1 \quad (1)$$

$$Da\ (kg/ha) = \frac{Q}{Ct} \quad (2)$$

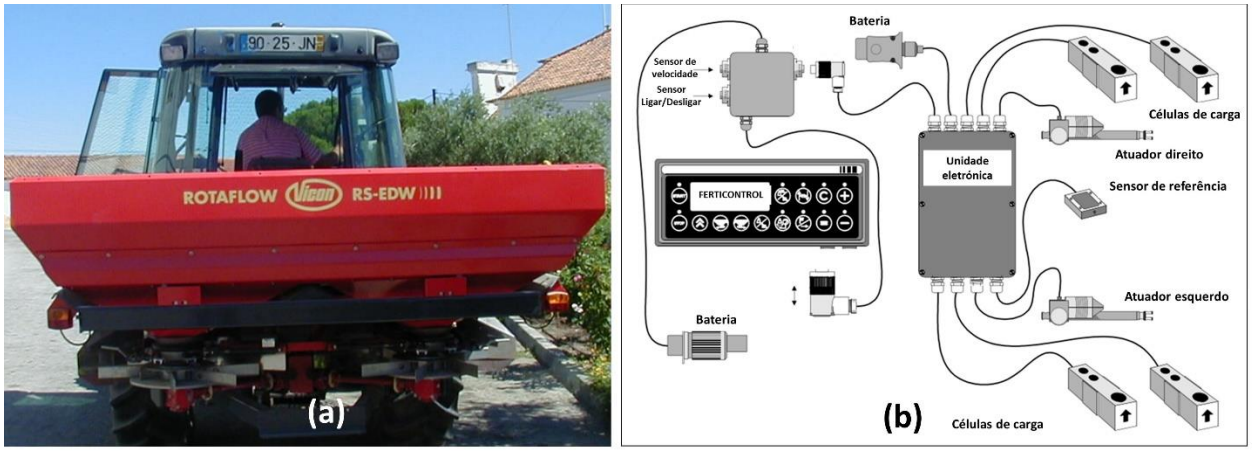


Figura 1. Distribuidor de adubo "Vicon RS-EDW" (a); pormenor dos componentes eletrónicos do distribuidor (b).

O distribuidor dispõe de dois atuadores elétricos lineares ("LINAK", modelo "3031PO"; Figura 2a) que permitem ajustar em contínuo a posição de três placas de dosagem (adufas) na base de cada tremonha, entre a posição "fechadas" (Figura 2b) e a posição "abertas" (Figura 2c), ajustando assim o caudal de adubo. Quando o microprocessador recebe instruções sobre a densidade de adubo a aplicar, compara estas instruções com as medições obtidas pelo sistema eletrónico de pesagem (células de carga). Quando não há correspondência entre a densidade programada e a densidade aplicada, o microprocessador dá instruções aos atuadores elétricos para ajustarem a abertura das adufas e, desta forma, garantirem a correspondência entre densidade programada e aplicada.

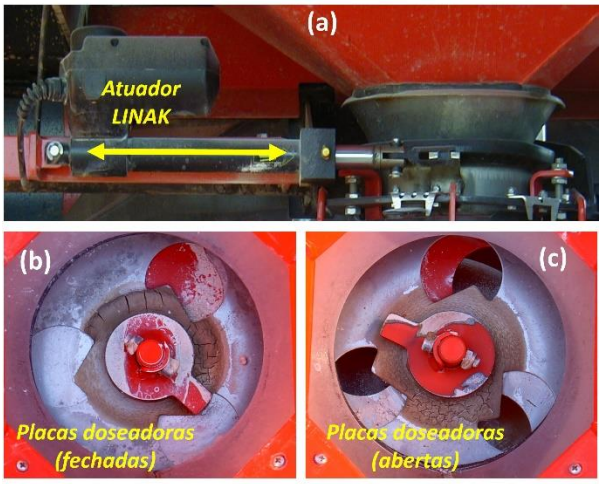


Figura 2. Pormenor dos atuadores elétricos (a) e da posição de abertura das adufas: completamente fechadas (b) e completamente abertas (c).

2.2. Comando do sistema de controlo do distribuidor para funcionamento em modo VRT

Inicialmente (entre 2004 e 2010) o distribuidor de adubo foi usado num projeto de AP, permitindo a aplicação a partir de um mapa de prescrição variável carregado através de um cartão de memória do tipo PCMCIA e do sistema "Fieldstar" da "Massey-Ferguson". A partir de 2014 este sistema, que operava em "Windows XP", tornou-se obsoleto em termos de software e de hardware (o formato de dados específico da marca e o tipo de cartão impediram a sua manutenção e a transferência de dados).

Para tentar resolver este problema, mantendo a funcionalidade do distribuidor em modo VRT, foi adquirido à "AAMS Ibérica" um monitor "InCommand 1200" (lançado em 2015 pela "Ag Leader") como monitor para controlo de tarefas em PA. Este controlador é compatível com terminais universais "ISO bus" (ISO 11783; [7]), o que permite ligar a diversas alfaias. No entanto, nenhuma de suas interfaces apresentou compatibilidade com o distribuidor "Vicon RS-EDW". Ao integrar equipamentos não compatíveis com o terminal "ISO bus" (como é o caso do "Ferticontrol"), a "Ag Leader" dispõe de vários módulos "CAN bus" para o monitor "InCommand" que permitem a ligação a controladores, sensores e atuadores de modelos mais antigos. A Figura 3 mostra esquematicamente a solução proposta para controlar o distribuidor "Vicon RS-EDW" em modo VRT, baseada num microcontrolador "Arduíno" e software de código aberto para tornar o "In-Command" ("Ag Leader") compatível com o "Ferticontrol".

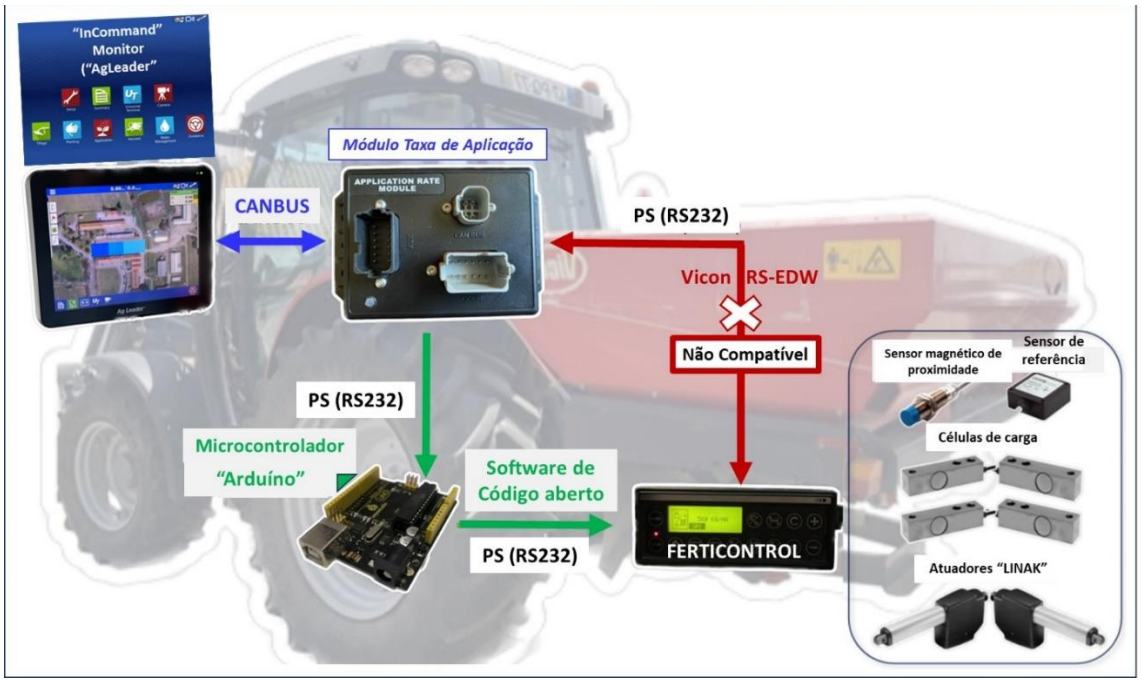


Figura 3. Solução VRT proposta neste estudo baseada num microcontrolador "Arduíno" e software de código aberto.

Em termos de programação foram realizadas as seguintes etapas:

1) No controlador "Ag Leader" procedeu-se a uma configuração de trabalho da aplicação de adubo no sistema "Direct Command", utilizando o monitor "InCommand" e o módulo "Application Rate". Foi estabelecida uma ligação série RS232 com o computador portátil (PC) e, utilizando um algoritmo desenvolvido em linguagem de programação "Python", foi possível enviar mensagens de instrução através do monitor "InCommand", por exemplo, com taxa de prescrição de "100 kg ha^{-1}" ("$RATE,100*1F").

2) Simultaneamente, o monitor "Fieldstar" foi configurado com um trabalho existente num cartão PCMCIA, para obter a mensagem que este envia ao controlador "Ferticontrol" para a mesma prescrição ("100 kg ha^{-1}").

3) Foi estabelecida uma ligação série RS232 em formato "T" entre os sistemas "Fieldstar" e "Ferticontrol", permitindo a ligação simultânea ao PC. Um algoritmo "Python" foi utilizado para capturar o conteúdo da mensagem ("$DOSES,0.00,100.0,100.0,100.0*7F") através da ligação série RS232 do PC.

4) Conhecendo a mensagem que o "Ferticontrol" necessita para assumir a densidade programada, foi realizado um teste de comunicação série RS232 entre o PC e o "Ferticontrol". A mensagem capturada na etapa anterior ("$DOSES,0.00.100.0,100.0,100.0*7F") foi enviada e aceite pelo monitor "Ferticontrol".

5) Em seguida, o conteúdo da mensagem foi alterado, variando a taxa de prescrição de 100 para 300 kg ha^{-1} ("$DOSES,0.00.300.0.300.0*7F"), mas esta não foi reconhecida pelo sistema "Ferticontrol".

6) Foram então analisadas duas mensagens ("$DOSES,0.00,100.0,100.0,100.0*7F" e "$DOSES,0.00,0.0,0.0,0.0*7E"), obtidas no monitor "Fieldstar" (prescrições programadas no cartão de memória com 100 e 0 kg ha-1, respetivamente) para tentar decifrar a encriptação da mensagem. Percebeu-se que os dois últimos carateres variavam dependendo do conteúdo da mensagem. Esses carateres funcionaram como um código de soma de verificação ("Checksum"), utilizado na comunicação "Fieldstar" - "Ferticontrol".

7) Foi desenvolvido um algoritmo "Python" para decifrar o padrão de cálculo do código de soma de verificação do sistema ("XOR", exclusivo).

8) Foi desenvolvido um algoritmo "Python" para calcular o código de soma de verificação a ser adicionado ao final de cada mensagem de comando "Ferticontrol".

9) Após a descodificação da mensagem (encriptação e soma de verificação; Figura 4) o sistema de controlo do distribuidor passou à fase de teste operacional.

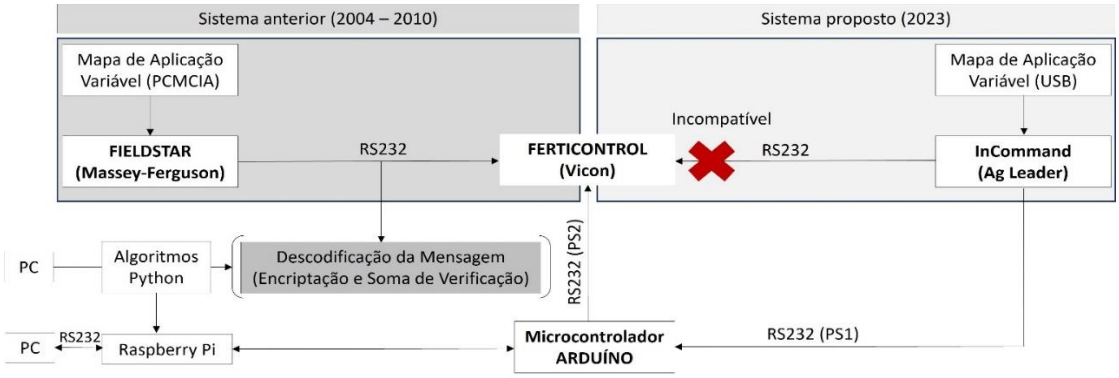


Figura 4. Solução VRT anterior versus solução atual proposta.

3. Resultados e Discussão

Como este distribuidor é usado na Herdade da Mitra (Universidade de Évora) na aplicação de adubo nas várias parcelas, não estaria disponível durante o período de testes de comunicação. Por esse motivo, foi desenvolvido um sistema emulador em "Raspberry Pi", com duas portas série RS232: uma simulava o envio da instrução de comando do "InCommand" (porta série 1, PS1) e a outra (PS2) simulava o recebimento a instrução de comando correspondente do sistema conversor, que neste caso era o PC. O comando recebido pelo emulador seria a instrução enviada ao "Ferticontrol", que era apresentada num LCD para verificação de formato. Este

sistema permitiu robustecer o algoritmo de comunicação e conversão de mensagens de comando. O circuito eletrónico desenvolvido é apresentado na Figura 5.

Utilizando um PC com o algoritmo desenvolvido em "Python" para converter o comando de instrução do "InCommand" para o "Ferticontrol", foi estabelecida uma ligação no trator entre o monitor "InCommand", o módulo "Application Rate" e o "Ferticontrol". Foi concebido um mapa de prescrição para testes operacionais de campo. Nestes testes foi necessário realizar um ajustamento de 0,5 segundos para sincronizar as mensagens.

O sistema de conversão, desenvolvido em "Python" no PC, foi migrado para um microcontrolador "Arduíno" com duas portas série RS232. Este sistema funciona em ciclo contínuo, onde a cada 0,5 segundos recebe a mensagem de comando do "InCommand", converte-a e envia-a para o monitor "Ferticontrol". Os testes de campo foram realizados com base no mapa de prescrição, com todos os equipamentos montados no trator. Os testes demonstraram que o monitor "Ferticontrol" assumiu a taxa de prescrição programada ("Direct Command"), em função da localização do trator na parcela experimental.

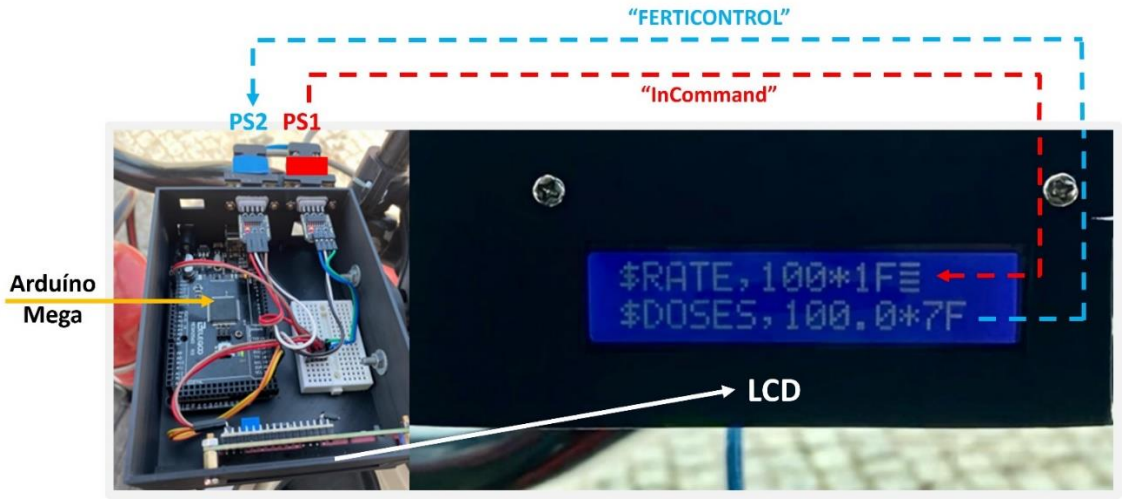


Figura 5. Circuito eletrónico desenvolvido.

A grande vantagem do sistema proposto é a integração de todos os equipamentos originais do distribuidor "Vicon RS-EDW" (controlador, sensores e atuadores), mantendo tanto a sua funcionalidade como a disponibilidade permanente para o uso nas atividades comuns da Herdade da Mitra e ainda, a robustez das calibrações de fábrica em termos de sensores (monitoração) e atuadores (controlo variável), na aplicação de adubos. Este sistema dispensou, por isso, novas calibrações dos sistemas de dosagem, pois já tinham sido parametrizados e testados em ensaios anteriores com o monitor "Ferticontrol" [8].

As caraterísticas do "hardware" e "software" utilizados, de fácil acesso e código aberto, permitem o controlo rápido e preciso do distribuidor "Vicon RS-EDW", em modo VRT, com a comunicação da taxa de aplicação entre o "In-Command" e o "Ferticontrol" a cada 0,5 segundos. Esse curto tempo médio de resposta para alternar entre as taxas alvo de adubo, é semelhante ao obtido em outros trabalhos com atuadores elétricos, como Al-Gaadi *et al*. [3] ou Alameen *et al*. [9]. Este tempo de resposta permitirá que o equipamento implemente, com precisão, mapas de prescrição variável, conseguindo uma variação efetiva nas taxas de aplicação entre as diferentes zonas de gestão.

4. Conclusões

Este trabalho apresenta uma solução de baixo custo que permite atualizar o sistema de controlo ("Ferticontrol") de um distribuidor "Vicon RS-EDW" para modo VRT, tornando-o compatível com o sistema "InCommand" da "Ag Leader". Esta solução tem o potencial e a versatilidade de responder a outras marcas e também a outros equipamentos, nomeadamente semeadores e pulverizadores. O desenvolvimento mostra que esta solução é acessível aos agricultores em geral.

É fundamental que os agricultores tomem consciência desta evolução, para que percebam que há um salto tecnológico a dar e que o dispendioso investimento inicial que fizeram em equipamentos há alguns anos, e que rapidamente se tornaram obsoletos, pode, afinal, continuar a ter retorno económico com o apoio destas parcerias.

Este tipo de desenvolvimentos e atualizações em máquinas agrícolas tecnologicamente obsoletas, cria também uma oportunidade de mercado, que pode levar à criação de pequenas novas empresas prestadoras de serviços de base tecnológica, numa primeira fase, avaliando cada situação e escolhendo as melhores opções de implementação. Estas parcerias garantem a permanente inovação e representam um passo decisivo para uma agricultura moderna, tecnológica, competitiva e sustentável, particularmente importante para os agricultores com menos recursos.

Contribuição dos autores: "Conceptualização, J.S., A.A. e C.E.; metodologia, J.S., A.A. e C.E.; software, J.S., A.A. e C.E.; validação, J.S., A.A. e C.E.; análise formal, A.A.; investigação, J.S. e A.A.; recursos, J.S.; escrita—J.S. e A.A.; escrita—revisão e edição, J.S.; supervisão, J.S.; gestão do projeto, J.S.; aquisição de fundos, J.S. Todos os autores leram e concordam com a versão publicada do manuscrito."

Financiamento: "Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) no âmbito do Projeto UIDB/05183 e pelos projetos HIBA-HUB Iberia Agrotech (Creación de un Ecosistema Plurirregional para la Agrodigitalización a través de los Digital Innovation HUB) e PEGADA 4.0 (Sustentabilidade da Atividade Agrícola Suportada por Processos e Tecnologias Inteligentes)."

Declaração do Comité de Ética Institucional: "Não aplicável".

Declaração de Consentimento: "Não aplicável".

Conflito de Interesses: "Os autores declaram não haver conflito de interesses."

References

1. Maleki, M.R.; Mouazen, A.M., De Ketelaere, B.; Ramon, H.; De Baerdemaeker, J. On-the-go variable-rate phosphorus fertilization based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosyst. Eng*. **2008**, *99*, 35–46.
2. Mirzakhaninafchi, H.; Singh, M.; Bector, V.; Gupta, O.P.; Singh, R. Design and development of a variable rate applicator for real-time application of fertilizer. *Sustainability* **2021**, *13*, 8694.
3. Al-Gaadi, K.A.; Tola, E.; Alameen, A.A.; Madugundu, R.; Marey, S.A.; Zeyada, A.M.; Edrris, M.K. Control and monitoring systems used in variable rate application of solid fertilizers: A review. *J. King Saud Univ. Sci*. **2023**, *35*, 102574.
4. Grisso, R.B.; Alley, M.; Thomason, W.; Holshouser, D.; Roberson, G.T. *Precision farming tools: Variable-rate application*. Virginia Cooperative Extension; 2011; Publication 442-505, pp. 1–16.
5. Ess, D.R.; Morgan, M.T.; Parson, S. *Implementing site-specific management: map-versus sensor-based variable rate application*. Precision Agriculture, Purdue University, 2001; SSM-2-W.
6. Loon, J. V.; Speratti, A.; Govaerts, B. - Precision for smallholder farmers: A small-scale-tailored variable rate fertilizer application kit. *Agriculture* **2018**, *8*, 48.
7. Paraforos, D.S.; Sharipov, G.M.; Griepentrog, H.W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Comput. Electron. Agr.* **2019**, *163*, 104863.
8. Serrano, J.M.; Peça, J.O., Shahidian, S. Evaluation of variable rate technology for fertilizer application in permanent pastures. *J.* Agric. *Sci. Techn.* **2011***, 4*, 489–499.
9. Alameen, A.A.; Al-Gaadi, K.A.; Tola, E. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Comput. Electron. Agr.* **2019**, *160*, 31–39.

Review on damage susceptibility of fresh horticultural products during mechanical and robotic harvesting

Coral Ortiz [1*], Antonio Torregrosa [1], and Carlos Blanes [2]

[1] Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València, Edificio 3F, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; torregro@dmta.upv.es; cortizmta.upv.es

[2] Instituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Edificio 8G. Acceso D. 3ª Planta, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.; carblac1@ai2.upv.es

* Correspondence: e cortiz@dmta.upv.es;

Abstract: Rising labor costs and labor shortages have led to numerous efforts to develop mechanical harvesting technologies. However, the high susceptibility of some fresh fruits and vegetables to mechanical damage remains a critical challenge. Recent advances in robotics have initiated the creation of robotic arms and end-effector prototypes for harvesting fresh products, but many prototypes fail to adequately address potential fruit damage. Some studies rely on simulated products rather than testing with actual fruit, and many designs claiming delicate handling have not rigorously evaluated their impact on product damage. This study reviews existing publications on fruit damage in fresh horticultural products during mechanical harvesting, as well as on robotic systems for fruit and vegetable harvesting, highlighting the need for robust experimental designs to evaluate damage susceptibility under practical conditions.

Keywords: mechanical harvesting; robot harvesting; damage; vegetable; fruit; handling

1. Introduction

Manual fruit and vegetable harvesting is a high-cost, labor-intensive, and time-consuming process, often accounting for more than 30-40% of total production costs ([1]-[3]).

For several decades, various machines have been designed and developed for harvesting not only grains but also fruits and vegetables ([4]). However, most of these machines have been developed for products that are destined for the process industry and not for the fresh market, and the susceptibility to damage is not a critical problem. Some examples are grapes for wine, olives for oil, cherries, apples, apricots, prunes, peaches, oranges, strawberries, and tomatoes for processed products, and nuts ([5]).

Most mechanical systems are based on vibratory systems. Trunk shakers with or without an inverted umbrella to collect the fruits are being used for nuts and olives and tested for citrus fruits ([6], [7]).

Continuous harvesters are typically used for vineyards and also for ultra-intensive olive or citrus orchards ([8], [9]). These continuous canopy shakers are based on a low frequency high amplitude vibration of the canopy.

Hand-held systems powered by a petrol engine or electricity are being used to assist in harvesting activities ([10]). These machines frequently require human oversight and assistance. They are generally used in contexts where human labor is still essential to the harvesting process.

For delicate fruits and vegetables destined for the fresh market, manual harvesting has been mandatory due to their fragility and susceptibility to damage ([11]). These perishable products require careful handling to maintain their quality, appearance, and shelf life, as machines lack the delicacy needed to pick and transport them without causing damage ([12]). As a result, labor-intensive hand-picking remains the preferred method, ensuring that consumers receive the freshest, most visually appealing fruits and vegetables ([13]).

Fruit harvesting requires four main operations: identifying the piece, detaching, collecting and transporting. Harvesting platforms have been used to address the collecting and transportation of the produce while the identification and detachment are carried out by operators.

On the other hand, robotic systems have been proposed to address this delicate fruit harvesting that consumes high labor costs. Several proposals have been done during the last decades. However, practically no commercial devices are being used for fresh, delicate fruit and vegetables. Automation in harvesting remains a challenge for fresh produce.

This paper presents a revision of different studies based on fresh vegetables and fruit damage during harvesting using different systems, manual harvesting to mechanical harvesting, as well as robotic systems.

2. Fruit damage

Bruise damage is a common mechanical injury in fresh produce caused by impact, compression, vibration, or abrasion against various materials or other fruits and vegetables ([14]). Different forces contribute to mechanical damage in fresh

products, including impact, compression, abrasion, vibration, cutting, and puncturing ([15]).

Bruising in fruit happens when excessive impact or pressure breaks the cell membranes on the Surface ([16]). The loss of cell wall integrity and the resulting decrease in peel resistance to mechanical damage contribute to the development of bruising ([17]).

Vegetable material conditions (physical properties, such as texture and ripeness stage) are crucial parameters that affect fruit and vegetable damage susceptibility ([18]). It is important to assess product characteristics when assessing damage.

Different techniques have been proposed to assess fruit damage. Drop and compression tests have been used to assess mechanical damage to fruit ([19], [20]). In these experiments, the fruits are dropped from different heights on diverse surfaces, and the bruise is measured in width and depth. Produce simulators, like "electronic" apples and potatoes, have been used to identify critical points where mechanical damage is likely to occur in harvest or postharvest operations ([21]). Some studies have combined drop tests and “electronic” fruit and compared the results to fruit dropping tests ([22]).

3. Fruit and vegetable damage during manual harvesting

Manual harvest has been considered the most delicate system to carefully handle and collect fruit ([23]). However, some studies have shown that manual harvesting could also produce damage, especially depending on the finger force, the tools used for the detachment, and the dropping heights to the collecting box ([24], [25]).

3. Fruit and vegetable damage during mechanical harvesting

Mechanical harvesting of fruit has been developed for many non-delicate fruits, such as nuts, or those intended for industrial use. However, for the fresh-market, fruit removal efficiency and fruit quality are important challenges that need to be addressed ([26]).

Most of the harvesting systems are based on vibratory movements. Several studies have been addressed assessing fruit or vegetable damage during mechanical harvesting ([27]-[31]).

Most of the damages are produced during the collecting operation. The shock absorbing capacity of the reception surface is crucial to reduce possible fruit damage ([22]).

Different combinations of vibratory frequency, amplitude, and time have been tested for various products to obtain a selective harvesting. However, achieving selective harvesting is extremely difficult ([32],[33]). For some products, harvesting platforms have been designed to obtain selective detaching, using manual picking and reducing cost by reducing the harvesting time in collecting and transporting ([34]). Nevertheless, the damage produced to the fruit has still to be considered, and the cost reduction is limited.

4. Fruit and vegetable damage during robotic harvesting

Since mechanical harvesting is still not adequate for delicate products or selective harvesting, several harvesting robots have been proposed ([35]).

Most of the studies are based on fruit identification algorithms ([36], [37]).

Some of the studies focus on the grasping system ([38]), and a part of them refer to the product damage ([39]). However, in most cases the information about the damage experiment is incomplete. In many cases, there are no information about the experimental procedure or the physical properties and ripeness stage of the fruits (Table 1). Dimensions and texture characteristics of the products are essential parameters in order to assess damage. Besides, there is usually no information about the collecting system and the way the fruit or vegetable piece is placed into the harvesting box is also important when evaluating damage. Table 1 presents a summary of several studies on robotic systems for harvesting fresh products that indicated a delicate treatment of the product.

Table 1. Studies about robotic systems for harvesting delicate fresh products.

Product	Grasping Detaching	Collecting	Damage procedure	Product properties	References
Pepper	Knife+ Catching	Bin	Limited	Yes	[40]
Tomato	Suction + scissor	No	Limited	No	[41]
Plum	4 fingers	Basket	No	No	[42]
Blackberry	3 fingers	No	No	No	[43]
Apple	Suction + 4 fingers	No	Very limited	No	[44]
Small fruits (strawberry)	Sensorized gripper	No	No	No	[45]
Cucumber	Suction + cutting	Box	Very limited	No	[46]
Blackberry and others	Twisting-Tube	No	No	No	[47]
Mushroom	Cartesian + fingers	No	No	No	[48]
Kiwifruit	3 fingers	No	Very limited	No	[49]

As can be seen in Table 1, the description of the damage experiment is not clearly defined in most of the studies. Some studies indicated gentle harvesting of the product without including any damage experiment. Besides, in some cases, the main dimensions of the product are assessed, but there is no reference to the product texture characteristics (or ripeness stage).

5. Conclusions

High labor costs encourage the use of mechanical and robotic harvesting for fresh fruits and vegetables. Mechanical harvesting is limited by fruit damage and the challenges of selective harvesting.

Several studies have tested different robots and soft grippers for picking delicate fruits, with many reporting a reduced percentage of damage. However, many prototypes that claimed delicate handling have not rigorously evaluated their impact on product damage. The description of the damage experiments is not clear or is missing. Furthermore, essential characteristics of fruits and vegetables, such as firmness and ripeness stage, have not been considered.

This review emphasizes the need to develop automated systems for harvesting fresh fruits and vegetables. However, it also discusses the importance of conducting parallel studies of the products and rigorous damage experiments to justify the delicate handling.

Author Contributions: Conceptualization, A.T. and C.O.; methodology, C.O.; formal analysis, C.O and C.B.; investigation, A.T., C.O. and C.B.; resources, A.T., C.O. and C.B.; writing—original draft preparation, C.O.; writing—review and editing, A.T., C.O. and C.B.; visualization, C.O.; supervision, A.T. and C.B.; project administration, C.O.; funding acquisition, C.O. and C.B.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Funding: This research was funded by the Valencia Government (Spain) through the projects "Recolección inteligente y automatizada de cultivos de alto valor en invernaderos sostenibles (INNEST/2023/106)".

References

1. Sanders, K. F. (2005). Orange harvesting systems review. Biosystems Engineering, 90(2), 115-125.
2. Brotons-Martínez, J. M., Martin-Gorriz, B., Torregrosa, A., & Porras, I. (2018). Economic evaluation of mechanical harvesting of lemons. Outlook on Agriculture, 47(1), 44-50.
3. Afsah-Hejri, L., Homayouni, T., Toudeshki, A., Ehsani, R., Ferguson, L., & Castro-García, S. (2022). Mechanical harvesting of selected temperate and tropical fruit and nut trees. Horticultural Reviews, 49, 171-242.
4. Kelly, C. F. (1967). Mechanical harvesting. Scientific American, 217(2), 50-59.
5. Sarkar, P. (2021). Use of shaking mechanism and robotic arm in fruit harvesting: a comprehensive review.
6. Torregrosa, A., Ortí, E., Martín, B., Gil, J., & Ortiz, C. (2009). Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain. Biosystems Engineering, 104(1), 18-24.
7. Torregrosa, A., Porras, I., & Martín, B. (2010). Mechanical harvesting of lemons (cv. Fino) in Spain using abscission agents. Transactions of the ASABE, 53(3), 703-708.

8. Castro-Garcia, S., & Ferguson, L. (2017). Mechanical harvesting of olives. Olives and Olive Oil as Functional Foods: Bioactivity, Chemistry and Processing, 117-126.
9. Roka, F. M., Ehsani, R. J., Futch, S. H., & Hyman, B. R. (2014). Citrus mechanical harvesting systems-Continuous canopy shakers. Florida: Food and Economic Resources Department, 1-5.
10. Khan, A. A., Islam, M. A., Saad, A., Raza, S. M., Ali, I., Sheraz, K., ... & Ali, M. (2023). Prospects and Scope of Olive Mechanization: A Review. Zoo Botanica, 1(2), 79-93.
11. Li, P., Lee, S. H., & Hsu, H. Y. (2011). Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems. Procedia Engineering, 23, 351-366.
12. Van Zeebroeck, M., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolaï, B. M., & Tijskens, E. (2007). Impact damage of apples during transport and handling. Postharvest biology and technology, 45(2), 157-167.
13. Młotek, M., Kuta, Ł., Stopa, R., & Komarnicki, P. (2015). The effect of manual harvesting of fruit on the health of workers and the quality of the obtained produce. Procedia Manufacturing, 3, 1712-1719.
14. Fadiji, T., Kaseke, T., Lufu, R., Li, Z., Opara, U. L., & Fawole, O. A. (2024). Impact of Packaging on Bruise Damage of Fresh Produce. In Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control (pp. 311-336). Singapore: Springer Nature Singapore.
15. Pathare, P. B., Mphahlele, R., & Al-Dairi, M. (2024). Bruise Damage Susceptibility of Pome Fruit. In Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control (pp. 115-129). Singapore: Springer Nature Singapore.
16. Bugaud, C., Ocrisse, G., Salmon, F., & Rinaldo, D. (2014). Bruise susceptibility of banana peel in relation to genotype and post-climacteric storage conditions. Postharvest biology and technology, 87, 113-119.
17. Opara, U. L., & Hussein, Z. (2024). Factors affecting bruise damage susceptibility of fresh produce. In Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control (pp. 21-44). Singapore: Springer Nature Singapore.
18. Ortiz, C., & Torregrosa, A. (2014). Mechanical properties of citrus and impact damage under different storage conditions. Transactions of the ASABE, 57(2), 593-598.
19. Celik, H. K., Ustun, H., Erkan, M., Rennie, A. E., & Akinci, I. (2021). Effects of bruising of 'Pink Lady'apple under impact loading in drop test on firmness, colour and gas exchange of fruit during long term storage. Postharvest Biology and Technology, 179, 111561.
20. Hou, J., Zhu, Z., Hu, W., He, Z., Sun, Q., & Yue, X. (2023). Analysis of damage caused by drop impacts for mulberry fruits: An dropping experiment and numerical simulation. Journal of Food Process Engineering, 46(5), e14316.
21. Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2024). Mechanical damage of fresh produce: An overview. Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control, 1-19.
22. Ortiz, C., Blasco, J., Balasch, S., & Torregrosa, A. (2011). Shock absorbing surfaces for collecting fruit during the mechanical harvesting of citrus. Biosystems engineering, 110(1), 2-9.
23. Sanders, K. F. (2005). Orange harvesting systems review. Biosystems Engineering, 90(2), 115-125.
24. Khatri, S., Shrestha, S., & Pokharel, K. P. (2022). Investigation of different manual harvesting tools performance for harvesting output, mechanical injuries, storability and post-harvest physio-chemical attributes of mandarin fruit in Nepal. Journal of Horticulture and Postharvest Research, 5(1), 35-52.
25. Hussein, Z., Fawole, O. A., & Opara, U. L. (2020). Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruits. Horticultural Plant Journal, 6(1), 1-13.
26. Młotek, M., Kuta, Ł., Stopa, R., & Komarnicki, P. (2015). The effect of manual harvesting of fruit on the health of workers and the quality of the obtained produce. Procedia Manufacturing, 3, 1712-1719.
27. Zhou, J., He, L., Zhang, Q., & Karkee, M. (2014). Effect of excitation position of a handheld shaker on fruit removal efficiency and damage in mechanical harvesting of sweet cherry. Biosystems engineering, 125, 36-44.
28. Arazuri, S., Arana, I., & Jaren, C. (2010). Evaluation of mechanical tomato harvesting using wireless sensors. Sensors, 10(12), 11126-11143.
29. Zhang, Z., Heinemann, P. H., Liu, J., Baugher, T. A., & Schupp, J. R. (2016). The development of mechanical apple harvesting technology: A review. Transactions of the ASABE, 59(5), 1165-1180.
30. Wang, W., Lu, H., Zhang, S., & Yang, Z. (2019). Damage caused by multiple impacts of litchi fruits during vibration harvesting. Computers and Electronics in Agriculture, 162, 732-738.

31. Ortiz, C., Torregrosa, A., & Castro-García, S. (2022). Citrus fruit movement assessment related to fruit damage during harvesting with an experimental low-frequency–high-amplitude device. Agronomy, 12(6), 1337.
32. Pu, Y., Wang, S., Yang, F., Ehsani, R., Zhao, L., Li, C., ... & Yang, M. (2023). Recent progress and future prospects for mechanized harvesting of fruit crops with shaking systems. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 16(1), 1-13.
33. Villibor, G. P., Santos, F. L., Queiroz, D. M., Khoury Junior, J. K., & Pinto, F. A. (2023). Vibration Transmissibility of the Coffee Fruit-Peduncle System: a Forced Vibration Study of High Frequency Aiming Mechanical Harvesting. Engenharia Agrícola, 43, e20220201.
34. Sim, A., Pearse, J., McGuinness, B., Williams, H., & Duke, M. (2024, August). Evaluation of a low-cost selective shaking device and soft surface catchment for fresh market blueberry harvesting. In 2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (pp. 2813-2818). IEEE.
35. Chen, Z., Zhang, H., Yang, H., Yan, Y., Sun, J., Zhao, G., ... & Fan, G. (2023). Optimization and Experimental Study of Structural Parameters for a Low-Damage Packing Device on an Apple Harvesting Platform. Agriculture, 13(9), 1653.
36. Armanini, C., Junge, K., Johnson, P., Whitfield, C., Renda, F., Calisti, M., & Hughes, J. (2024). Soft robotics for farm to fork: applications in agriculture & farming. Bioinspiration & Biomimetics, 19(2), 021002.
37. Yang, Y., Han, Y., Li, S., Yang, Y., Zhang, M., & Li, H. (2023). Vision based fruit recognition and positioning technology for harvesting robots. Computers and Electronics in Agriculture, 213, 108258.
38. Alaaudeen, K. M., Selvarajan, S., Manoharan, H., & Jhaveri, R. H. (2024). Intelligent robotics harvesting system process for fruits grasping prediction. Scientific Reports, 14(1), 2820.
39. AboZaid, Y. A., Aboelrayat, M. T., Fahim, I. S., & Radwan, A. G. (2024). Soft robotic grippers: A review on technologies, materials, and applications. Sensors and Actuators A: Physical, 115380.
40. Navas, E., Fernández, R., Sepúlveda, D., Armada, M., & Gonzalez-de-Santos, P. (2021). Soft grippers for automatic crop harvesting: A review. Sensors, 21(8), 2689.
41. Arad, B., Balendonck, J., Barth, R., Ben-Shahar, O., Edan, Y., Hellström, T., ... & van Tuijl, B. (2020). Development of a sweet pepper harvesting robot. Journal of field robotics, 37(6), 1027-1039.
42. Jun, J., Kim, J., Seol, J., Kim, J., & Son, H. I. (2021). Towards an efficient tomato harvesting robot: 3d perception, manipulation, and end-effector. IEEE access, 9, 17631-17640.
43. Brown, J., & Sukkarieh, S. (2021). Design and evaluation of a modular robotic plum harvesting system utilizing soft components. Journal of Field Robotics, 38(2), 289-306.
44. Gunderman, A. L., Collins, J. A., Myers, A. L., Threlfall, R. T., & Chen, Y. (2022). Tendon-driven soft robotic gripper for blackberry harvesting. IEEE Robotics and Automation Letters, 7(2), 2652-2659.
45. Visentin, F., Castellini, F., & Muradore, R. (2023). A soft, sensorized gripper for delicate harvesting of small fruits. Computers and Electronics in Agriculture, 213, 108202.
46. Wang, X., Kang, H., Zhou, H., Au, W., Wang, M. Y., & Chen, C. (2023). Development and evaluation of a robust soft robotic gripper for apple harvesting. Computers and Electronics in Agriculture, 204, 107552.
47. Jo, Y., Park, Y., & Son, H. I. (2024). A suction cup-based soft robotic gripper for cucumber harvesting: Design and validation. Biosystems Engineering, 238, 143-156.
48. Elfferich, J. F., Shahabi, E., Della Santina, C., & Dodou, D. (2024). BerryTwist: a Twisting-Tube Soft Robotic Gripper for Blackberry Harvesting. IEEE Robotics and Automation Letters.
49. Pagliarani, N., Tzafestas, C., Papadopoulos, E., Maragos, P., Mastrogeorgiou, A., Porichis, A., ... & Cianchetti, M. (2024, March). SoftGrip: Towards a Soft Robotic Platform for Automatized Mushroom Harvesting. In European Robotics Forum (pp. 48-52). Cham: Springer Nature Switzerland.
50. Wang, X., Hao, W., Zhang, J., He, Z., Ding, X., & Cui, Y. (2025). Development and evaluation of a soft end effector for kiwifruit harvesting. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 1-29.

Preliminary results on a Predictive Risk Model for Occupational Safety in Natural Cork Exploitation: A Case Study in Sierra de Espadán

Virgilio Rodriguez1*,Coral Ortiz1 and Edgar Lorenzo2

1 Rural and Agrifood Engineering Department, UniversitatPolitècnica de València, 46022 Valencia, Spain; ;vieliasro@gmail.com; cortiz@dmta.upv.es

2 ITACA Institute, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain;edlosae@etsiamn.upv.es

Resumen: La Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales y el Reglamento de los Servicios de Prevención establecen el marco legal básico de la seguridad laboral en España. Las Directivas europeas en materia de seguridad y salud, transpuestas al ordenamiento jurídico español, establecen criterios técnicos específicos. Sin embargo, sectores como el forestal necesitan directrices adaptadas para reducir los accidentes laborales y mejorar la cultura de la seguridad.

El sector de la explotación del corcho natural carece de estudios preventivos específicos. Este estudio introduce un modelo predictivo de riesgo para el trabajo de explotación del corcho. El caso de estudio se centra en la Sierra de Espadán. En la primera fase del estudio se seleccionaron parcelas representativas de alcornoque de aproximadamente 0,25 hectáreas. Se probó una población reducida de 15 árboles representativos, asegurando un intervalo de confianza del 95%. Se midieron los parámetros dendrométricos clave (diámetro a la altura del pecho, DAP (diámetro a la altura del pecho) y altura total del árbol). El tamaño poblacional se determinó con base en la metodología de [1]. Se calcularon los parámetros Índice de Riesgo e Índice de Cobertura de Sotobosque.

En conclusión, los modelos predictivos de riesgo, como el desarrollado en esta investigación, podrían no solo reducir los accidentes, sino también mejorar la confianza y la cultura de seguridad dentro del sector forestal, asegurando su sostenibilidad y productividad futuras en la Sierra de Espadán.

Palabras clave: predictivo; riesgo; modelo; seguridad; corcho;

Abstract: The Occupational Risk Prevention Law 31/1995 and the Regulation of Prevention Services establish the basic legal framework for workplace safety in Spain. European Directives on health and safety, transposed into Spanish law, set specific technical criteria. However, sectors like forestry need tailored guidelines to reduce workplace accidents and enhance safety culture.The natural cork exploitation sector lacks specific preventive studies. This study introduces a predictive risk model for the cork exploitation work. The case study focuses on Sierra de Espadán.In the first phase of the study, representative cork oak plots of approximately 0.25 hectares wereselected. A reduced population of 15 representative trees were tested, ensuring a 95% confidence interval. Key dendrometric parameters (diameter at breast height, DBH (diameter at breast height), and total tree height) were measured. The population size was determined based on the methodology of [1]. Risk index and Underbrush Cover Index parameters were calculated.

In conclusion, predictive risk models, like the one developed in this research, could not only reduce accidents but also improve confidence and safety culture within the forestry sector, ensuring its future sustainability and productivity in the Sierra de Espadán.

Keywords: predictive; risk; model; safety; cork;

1. Introduction

During the 1990s, directives on preventive matters were developed within the European Economic Community, with the publication of normative regulations as consequence of the legal framework establishedinLaw31/1995, of 8 November, on Risk Prevention in the Workplace [LeydePrevenciónde RiesgosLaborales] (BOE, 1995) as well as Royal Decree 39/1997, of January 17, which approves the Regulation of Prevention Services.

The natural cork exploitation sector lacks specific preventive studies [2,3].

[4] indicated that forestry operations are generally characterized by a combination of personal and environmental risks to workers' health and safety.

Cork extraction work is a seasonal employment, carried out outdoors, exposing workers to extreme weather conditions (such as extreme temperatures and humidity, rain, and ultraviolet radiation) and risks mainly related to ergonomics and occupational safety [5,6]. Besides, the operations are usually done in inaccessible locations that contribute to an increased risk of accidents and occupational diseases.

Various studies have been developed to address occupational risk prevention in forestry works [7-9]. However, limited studies have approached the cork extraction works. These activities are crucial in strengthening and maintaining community resilience.

Different models have been proposed for addressing occupational risk prevention, connecting the working conditions and worker behaviour to the probability of an accident [10]. Some authors have presented model prepared for a specific sector as [11]. In construction, shipbuilding industry [12] or [13] in production facilities.

The objective of the present study presents a preliminary model to Predict Risks Model in the Natural Cork Exploitation, using a case of study in Sierra de Espadán (Spain).

2. Materials and Methods

Thirty-six representative cork oak plots of approximately 0.25 hectares, from two different municipalities were selected. A reduced population of 15 representative trees were tested per plot, ensuring a 95% confidence interval. Key dendrometric parameters (diameter at breast height, DBH (diameter at breast height), trunk height, number of peels and total tree height) were measured. The population size was determined based on the methodology of [14]. Risk index and Underbrush

Cover Index parameters were calculated and the index of the fraction of the covered area of the scrubland.

The statistical analysis was performed with a commercially available software package (Statgraphics Centurion 18 Software, version 18.1.13 (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, USA). One-way analysis of variance and discriminant analysis were used.

3. Results

In a first step, based on an expert analysis of the plots, the "Expert Risk Level" was defined, Table 1.

Table 1. "Expert Risk Level" established based on expert criteria.

Expert Risk level	Trees angle/ presence of trees and shrub	Average Slope
High	Trees with a twisted trunk at an angle greater than 60° from the vertical, presence of adjacent trees <1m apart, or presence of uneven terrain, embankments <1m from the trunk to be debarked.	> 60%
Medium	Trees with a twisted trunk at an angle between 30° and 60° from the vertical, or trees with a straight trunk but with significant shrub presence around 1m.	30-60%
Low	Trees with a straight trunk at an angle less than 30° from the vertical and no significant shrub presence around 1m.	< 30%.

In a second step the values of the main variables were evaluated, Table 2.

Table 2. Table of the study including the area of the plots, tested area, angle inclination of the plot, height of corkage, diameter of the trunk in centimeters to 1.3 meters, coefficient of uncorking, total height of the tree and height of the trunk.

	Average	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
Area (Ha)	1,95	0,11	1,74	2,16
Tested area (m2)	20510,30	1083,77	18381,50	22639,10
Slope angle (°)	54,69	16,34	0,30	16,90
HD (m)	1,67	0,03	1,62	1,72
Diameter at 1,3 m (cm)	19,76	0,43	18,91	20,62
CD (HD/diameter)	1,17	0,06	1,06	1,27
Totalheight (m)	4,78	0,07	4,65	4,91
Trunkheight (m)	1,74	0,02	1,69	1,78

Significant differences in slope angle were found according to the risk level for the Alfondeguilla municipality, Figure 1. However, no significant differences were found in the case of Chovar unicipality.

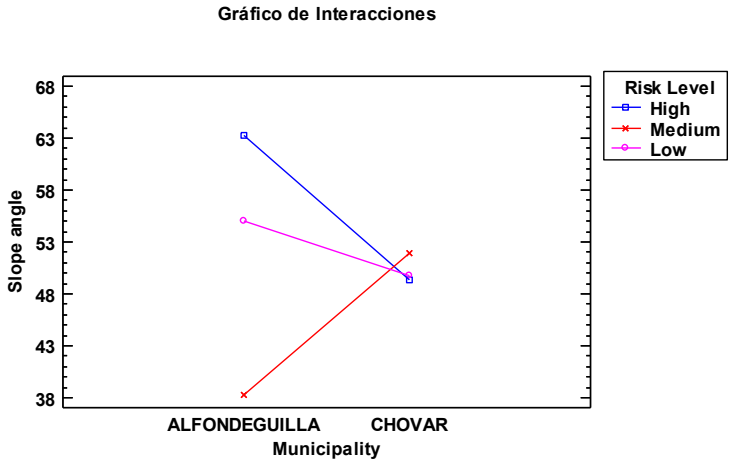


Figure 1. Slope angle according to the risk level for the Alfondegulla and Chovar municipallities.

A discriminant analysis model was developed to classify the trees according to the previous risk level established by the expert, with nearly a 70 % of well classified trees, Table 3.

The mode classified into the three risk levels based on the variables slope angle, diameter at 1,3 m (m), total height and trunk height (m).

The capability of discriminating the medium risk cases is very low. However, the model showed acceptable results classifying the extreme cases, high and low risk level trees.

Table 3. Classification Table from the discriminant analysis to classify the trees according to the previous risk level.

Number (percentage %)		***Predicted Risk Level***		
Actual Risk Level	**Size**	**High**	**Medium**	**Low**
High	159	114 (71.7)	0 (0.0)	45 (28.3)
Medium	18	6 (33.3)	9 (50.0)	3 (17.)
Low	123	36 (29.3)	6 (4.9)	81 (65.9)

This preliminary analysis shows the possibility of designing a model that could assess the risk level in the cork extraction operation according to the plot and the tree characteristics.

4. Conclusions

A first preliminary study has been carried out to understand the variables that could be introduced in a predictive model to classify the risk of the cork extraction operation based on the three characteristics and some plot characteristics such as

slope angle of the land, access to the extraction route, stoniness index, or percentage of area covered by scrub.

A discriminant analysis model was designed with nearly 70 % of well classified trees.

Predictive risk models, such as the preliminary one developed in this study, have the potential to assess risks, propose preventive measures for reduce accidents, and promote a stronger preventive culture within the forestry sector, contributing to its long-term sustainability and productivity in the Sierra de Espadán.

Author Contributions: Conceptualization, E.L.,V.R., and C.O.; methodology, E.L. and C.O.; formal analysis, C.O., E.L., and V.R.; investigation, E.L. and V.R.; resources, E.L. and V.R.; writing—original draft preparation, C.O..; writing—review and editing, C.O.; supervision, E.L. and V.R.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Not applicable.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: Espadan Corks, S.L. Adolfo Miravet.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Hapla, F.; Saborowski, J. Forestry and Wood production sector.
2. Billorou, N.; Sandoya, J. Guide for the mainstreaming of occupational safety and health in vocational training programmes in the wood sector.
3. Araújo-Vila, N., Toubes, D. R., Fraiz-Brea, J. A. The age factor in the analysis of occupational risks in the wood industry. 2022; Vol. 10. https://doi.org/10.3390/healthcare10071355
4. Lilley, R., Feyer, A. M., Kirk, P., & Gander, P. A survey of forest workers in New Zealand: Do hours of work, rest, and recovery play a role in accidents and injury?. Journal of safety research, 2020; Volume 33, (pp. 53-71). https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00003-8
5. Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., &Gabarrell, X. Environmental analysis of raw cork extraction in cork oak forests in southern Europe (Catalonia–Spain). Journal of environmental management, 110, (pp. 236-245). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.024
6. Knecht, H., Balanay, J. A. G., Langley, R., Tutor Marcom, R., & Richards, S. L. Systematic Review of Biological, Chemical, Ergonomic, Physical, and Psychosocial Hazards Impacting Occupational Health of United States Forestry Workers. Journal of Forestry, Volume 122, (pp. 159-170). https://doi.org/10.1093/jofore/fvad052
7. Landekić, M., Martinić, I., Mijoč, D., Bakarić, M., &Šporčić, M.. Injury patterns among forestry workers in Croatia. Forests 2021. https://doi.org/10.3390/f12101356
8. Kaakkurivaara, T., Borz, S. A., &Kaakkurivaara, N.. Risk factors and occupational safety failures in forest work in the Southeast Asian region. Forests 2022. https://doi.org/10.3390/f13122034
9. Dimou, V., Tioutiountzi, T., Malesios, C. Determining occupational exposure to inhalable wood dust in motor manual felling and processing. International Journal of Forest Engineering; 2024, Volume 35, (pp. 399-409). https://doi.org/10.1080/14942119.2024.2336688

10. Papazoglou, I. A., Aneziris, O. N., Bellamy, L. J., Ale, B. J., & Oh, J. Quantitative occupational risk model: Single hazard. Reliability Engineering & System Safety, 160, (pp. 162-173).
11. Mohandes, S. R., Zhang, X. Towards the development of a comprehensive hybrid fuzzy-based occupational risk assessment model for construction workers. Safety science, 2019; Vol. 115. (pp. 294-309).
12. Fragiadakis, N. G., Tsoukalas, V. D., Papazoglou, V. J. An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry. Safety Science; 2014, Volume 63, (pp. 226-235). https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.013
13. Gul, M., Yucesan, M., Karci, C. A stratified Bayesian decision-making model for occupational risk assessment of production facilities. Engineering Applications of Artificial Intelligence; 2024, Volume 133, Part C. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108283
14. Hapla, F.; Saborowski, J. Stichprobenplanung für holzanatomische Untersuchungen. HolzRoh- und Werkstoff; 1987, Volume 45, (pp.141-144). https://doi.org/10.1007/BF02627564

Desempeño de los modelos de RT-DETR y YOLOv9 en la identificación de malezas en maíz

García-Navarrete O.L[1-2,*], Bregon A[3], Martín-García J[4], Camacho-Tamayo J.H[2] and Navas-Gracia L.M[1*]

[1] TADRUS Research Group, Department of Agricultural and Forestry Engineering, University of Valladolid, 34004 Palencia, Spain; oscarleonardo.garcia@uva.es, luismanuel.navas@uva.es

[2] Department of Civil and Agricultural Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 111321, Colombia; olgarcian@unal.edu.co, jhcamachot@unal.edu.co

[3] Department of Computer Science, University of Valladolid, 47011 Valladolid, Spain; anibal.bregon@uva.es

[4] Recognised Research Group AGROBIOTECH, UIC-370 (JCyL), Department of Plant Production and Forest Resources, Higher Technical School of Agricultural Engineering of Palencia, University Institute for Research in Sustainable Forest Management (iuFOR), University of Valladolid, 34004 Palencia, Spain; jorge.marting@uva.es

* Correspondence: oscarleonardo.garcia@uva.es (O.L.G.-N.);

Abstract: Las malezas son plantas invasoras que compiten con los cultivos por recursos como espacio, agua, nutrientes y luz, afectando su productividad. Para mitigar su impacto, se emplea la escarda de precisión, que combina imágenes digitales y algoritmos avanzados para identificarlas. En este estudio, se usaron imágenes de cultivos de maíz (*Zea mays L.*) para detectar cuatro malezas: *Lolium perenne*: mh1, *Sonchus oleraceus*: mh2, *Solanum nigrum*: mh3 y *Poa annua*: mh4. Se evaluaron dos modelos de CNN: Real-Time Detection Transformer (RT-DETR-l) y YOLOv9s. YOLOv9s obtuvo un mAP@0.5 de 0.834 y mAP@0.5-0.95 de 0.452. Su F1-Score de 0.78 muestra un buen balance entre precisión y recall, aunque su umbral de confianza 0.280, lo hace más sensible. La precisión por clase fue destacada, con 0.909 en maíz y 0.893 en mh2. RT-DETR-l tuvo mejor equilibrio global, con un F1-Score de 0.80 y un umbral de 0.458, haciéndolo más conservador. Sin embargo, presentó más falsos positivos en maíz y mh1 comparado con YOLOv9s, aunque sobresalió en recall para mh3 y mh4. Se concluye que YOLOv9s es el más adecuado para un sistema de detección de malezas en maíz.

Keywords: deep-learning; Precision agriculture; convolutional neural network; precision weeding

1. Introducción

El maíz (Zea mays L.) es el principal cereal cultivado a nivel mundial, con una producción de 1.16 mil millones de toneladas en 2022 [1]. Su relevancia económica abarca tanto el consumo humano como su uso en la industria y la alimentación animal. Para garantizar altos niveles de producción, es fundamental un manejo

agronómico eficiente, especialmente en el control de malezas [2]. Estas compiten con los cultivos por recursos esenciales como luz, agua y nutrientes, reduciendo el rendimiento hasta en un 42% [3] [4], Aunque el control de malezas se basa principalmente en la aplicación de herbicidas, su uso excesivo conlleva impactos ambientales y riesgos para la salud [5]. Métodos alternativos, como la escarda mecánica, resultan costosos, lo que ha impulsado el desarrollo de soluciones basadas en nuevas tecnologías para optimizar su eficiencia y reducir el impacto ambiental. El avance de la Inteligencia Artificial (IA) ha revolucionado el sector agrícola, impulsando el uso de tecnologías como el aprendizaje de maquina (ML), la visión por computadora y la robótica, las cuales permiten la captura y análisis de grandes volúmenes de datos, facilitando la toma de decisiones [6]. El Deep Learning (DL), una rama del ML, la cual emplea redes neuronales profundas (Deep Neural Networks, DNN) para procesar grandes volúmenes de datos y extraer patrones complejos de manera autónoma. Una de sus aplicaciones en la agricultura es la escarda de precisión, la cual emplea sensores de imágenes y algoritmos computacionales para aplicar herbicidas únicamente cuando se detectan malezas[7]. Esta integración tecnológica permite diferenciar cultivos de malezas en distintas condiciones, optimizando la aplicación de herbicidas de manera precisa y controlada [8], Sin embargo, la detección de malezas enfrenta desafíos debido a similitudes en color, textura y forma con los cultivos, así como a variaciones en iluminación y oclusiones [9], [10]. Para superar estas dificultades, se han desarrollado algoritmos basados en DL [11], [12], con énfasis en Redes Neuronales Convolucionales (CNN), las cuales destacan por su capacidad para analizar imágenes, permitiendo una identificación precisa y robusta de malezas, incluso en entornos variables [13] [14] [8]. Además, respaldadas por grandes conjuntos de datos, las CNN han demostrado alta eficacia en la clasificación y detección de malezas teniendo una fuerte robustez frente a la variabilidad biológica y las diversas condiciones de las imágenes [15], [16], [17]. Su implementación ha permitido automatizar los procesos de escarda con mayor precisión y eficiencia, reduciendo la dependencia de métodos convencionales y optimizando el manejo de malezas en la agricultura moderna [9].

Una de las CNN más utilizadas en la detección de malezas en diferentes cultivos es la arquitectura YOLO (You Only Look Once) [18]. YOLO, desarrollada en 2016 por Redmon et al. [19], es una arquitectura de detección de objetos destacada por su rapidez y eficiencia, ya que aborda esta tarea como un problema de regresión en lugar de realizar clasificaciones independientes para cada región. La arquitectura YOLO ha evolucionado desde la versión inicial YOLOv1 hasta la YOLOv12, lanzada en febrero de 2025, optimizando su rendimiento y precisión. En diversos trabajos se han evaluado las diferentes versiones del modelo YOLO en la detección de

malezas, una de las más usadas es la versión YOLOv9, esta presenta una gama de modelos, diseñados para la detección de objetos de alto rendimiento, cada uno optimizado según distintos niveles de capacidad computacional y exigencias de precisión. Esta flexibilidad los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones. YOLOv9 se presentó en el 2024 por [20] marcando un avance significativo en la detección de objetos en tiempo real, introduciendo técnicas revolucionarias como la Información de Gradiente Programable (PGI) y la Red de Agregación de Capas Eficiente Generalizada (GELAN). YOLOv9 es desarrollado por un equipo independiente de código abierto, se basa principalmente en YOLOv5 [20]. En el trabajo de [21] evalúa las diferentes versiones de YOLO en la detección de malezas en cultivos de maíz, encontrado que la de mejor mAP@0.5 es la versión YOLOv9s. Aunque la serie YOLO se distingue por su equilibrio entre velocidad y precisión en la detección de objetos en tiempo real, su rendimiento se ve afectado por el uso de Non-Maximum Suppression (NMS). Este proceso introduce una mayor carga computacional al filtrar predicciones redundantes, lo que incrementa el tiempo de procesamiento y puede reducir la eficiencia del modelo; por lo que, en el 2020 el equipo de Facebook AI Research (FAIR), desarrolla los DEtection TRansformer (DETR) [22] basado en Transformers para la detección de objetos han logrado eliminar el NMS, lo que simplifica el flujo de trabajo del modelo, ya que no requiere un paso de postprocesamiento para filtrar predicciones redundantes. En 2023, [23] propuso Real-Time Detection Transformer (RT-DETR), un detector de objetos en tiempo real basado en la arquitectura DETR, diseñado para superar a los modelos YOLO mediante un enfoque end-to-end que elimina la necesidad de NMS. Su núcleo se basa en un codificador híbrido eficiente y una estrategia avanzada de selección de consultas. El codificador desacopla la interacción intraescala mediante autoatención (Attention-based Intra-scale Feature Interaction, AIFI) de la fusión entre escalas basada en convoluciones (Cross-scale Feature Fusion, CCFF), optimizando la eficiencia computacional. En términos de rendimiento, RT-DETR supera a YOLO tanto en precisión como en velocidad, beneficiándose del preentrenamiento en el conjunto de datos Objects365, lo que permite un mejor desempeño con menos parámetros [23] . Además, su capacidad de ajuste sin reentrenamiento le otorga mayor flexibilidad para adaptarse a distintos escenarios.

En este trabajo se realiza un análisis del rendimiento de los modelos YOLOv9s y RT-DETR-l, en la detección de cuatro tipos de malezas (Lolium rigidum, Sonchus oleraceus, Saolanun nigrum, Poa annua) en el cultivo de maíz dulce (Zea mays L.) sembradas en invernadero. Para el análisis del rendimiento se utilizó las matrices de confusión, las curvas Precision-Recall y F1-score – Confidence y las métricas de precisión, recall, F1-Score y mAP@0.5.

2. Materiales y Métodos

El estudio evaluó el rendimiento de los modelos RT-DETR-l y YOLOv9s en la detección de malezas en condiciones controladas bajo invernadero en el cultivo de maíz, con el objetivo de comparar su precisión, eficiencia y aplicabilidad en entornos agrícolas reales. La metodología se diseñó para garantizar la representatividad, precisión y comparabilidad de los datos, bajo configuraciones experimentales estandarizadas.

2.1 Material biológico y ubicación

El estudio se realizó entre el 4 de marzo y el 3 de mayo de 2024 en un invernadero climatizado del campus de La Yutera (Universidad de Valladolid). Las condiciones ambientales se mantuvieron controladas, con una temperatura constante de 24 °C y una humedad relativa del 60% Se empleó maíz dulce (*Zea mays* L.) debido a su relevancia agronómica en la región (Comunidad de Castilla y León - España). Se seleccionaron cuatro malezas representativas de la zona del estudio considerando su impacto competitivo y diversidad morfológica. Dos de las malezas son de hoja ancha (dicotiledóneas): *Sonchus oleraceus, y Solanum nigrum*, y dos de hoja estrecha (monocotiledóneas): *Lolium rigidum* y *Poa annua*.

2.2 Preparación del cultivo

Se sembraron 138 semillas de maíz (*Zea mays*) en sustrato dispuesto en camas elevadas, distribuidas en 46 recipientes (3 semillas por recipiente). Las plantas se mantuvieron hasta alcanzar la etapa fenológica V6 (60 días después de la siembra), correspondiente al final de la fase vegetativa. El periodo comprendido desde la emergencia de la planta hasta la etapa V6 se considera el periodo crítico debido a la alta demanda de nutrientes y la competencia con las malezas [2], [24].

2.3 Manejo de malezas

La introducción de malezas se realizó en dos fases:

- Etapa 1: del día 0 al día 30, se sembraron aleatoriamente las cuatro especies de malezas seleccionadas, con una densidad de 12 plantas por recipiente 552 en total. Las malezas se erradicaron al día 31 para simular condiciones de manejo agrícola real, donde estas no superan más de 30 días por la alta competencia.
- Etapa 2: del día 32 al día 60, se resembraron las mismas cuatro especies, esta vez con 9 plantas por recipiente (3 por planta de maíz, 414 en total), para un total de 966 plantas de maleza en las dos etapas.

2.4 Captura de imágenes

La adquisición de las imágenes se realizó mediante un sistema de visión montado sobre un carro de soporte, el cual se desplazaba de manera controlada sobre guías instaladas en la cama elevada del invernadero. Este sistema incorporó una cámara réflex Canon 850D con sensor CMOS de 22.3 × 14.9 mm, posicionada a una altura de 1 metro del sustrato del cultivo. Se empleó un objetivo EF-S 15-55 mm f/4-5.6 IS STM acoplado con un filtro polarizador circular PL-C de 58 mm para mejorar la calidad de captura. La iluminación fue provista por dos lámparas LED de luz blanca (6000 K) organizadas en una matriz de 6×6 diodos emisores de luz. Para minimizar los brillos en la superficie foliar, se utilizó una pantalla difusora con filtro polarizador ROSCO de transmisión del 38 % (1.5 f/stop), como se muestra en la Figura 1. Las imágenes fueron adquiridas en formato RGB con una resolución de 6000×4000 píxeles a lo largo de 35 días, abarcando desde la emergencia de la planta (día 12) hasta la finalización de la fase de desarrollo vegetativo (día 60), lo que resultó en un total de 1640 imágenes.

Figura 1. A la izquierda, Carro de soporte para la toma de imágenes, a la derecha, ubicación de las plantas sobre cama elevada del invernadero

2.5 Selección y etiquetado de las imágenes

Se eliminaron las imágenes que presentaran un desenfoque alto o que la planta fuera tan grande que se saliera de la escena. La eliminación fue de 240 imágenes, quedando un total de 1400 imágenes aptas para el entrenamiento. Posterior a este paso se procedió al etiquetado, que se llevó a cabo utilizando la herramienta de código abierto LabelImg. Se definieron cinco clases, asignando etiquetas abreviadas según las especies presentes en el estudio: maíz para las plantas de maíz, mh1 para *Lolium rigidum*, mh2 para *Sonchus oleraceus*, mh3 para *Solanum nigrum* y mh4 para *Poa annua* (Figura 2). En total, se generaron 4,200 etiquetas de cuadros delimitadores correspondientes a plantas de maíz y 10,322 etiquetas de malezas. El proceso de anotación fue realizado por expertos con conocimiento especializado en la identificación de estas especies, garantizando la precisión y coherencia del conjunto de datos.

(a) **(b)** **(c)** **(d)** **(e)**

Figura 2. **(a)** Clase maíz: *Zea mays L.*; **(b)** Clase mh1: *Lolium rigidum*; **(c)** Clase mh2: *Sonchus oleraceus*; **(d)** Clase mh3: *Saolanun nigrum*; **(e)** Clase mh4: *Poa annua*.

2.6 Selección de las arquitecturas y preparación de los datos

Se seleccionaron las arquitecturas YOLOv9s y RT-DETR-l. La arquitectura YOLO se caracteriza por ser empleada en diversas aplicaciones agrícolas, específicamente en el cultivo del maíz se encuentran trabajos como [25], [26], [27]. Se selecciona la versión YOLOv9 debido a que presenta un buen equilibrio entre precisión, velocidad, y requerimientos computacionales, además de obtener un mayor mAP@0.5 al ser comparado con otras versiones en el trabajo de [21]. Adicionalmente en este estudio se busca que los modelos analizados sean fácilmente entrenables, eficientes y ligeros, para que puedan ser implantados en un kit de desarrollo de computación avanzada embebido, por lo que seleccionamos el tamaño s “Small”, que es un modelo pequeño, adecuado para dispositivos con recursos limitados (embebidos), con un buen equilibrio entre velocidad y precisión, lo que lo hace adecuado para el desarrollo de sistemas de escarda de precisión que trabajan en tiempo real. En cuanto al modelo RT-DETR se seleccionó el más pequeño disponible que es la versión l “Large” el cual ofrece una mayor precisión y puede manejar más tipos de objetos con mayor exactitud, pero requiere más poder computacional.

2.7 Configuración de los datos y parámetros para el entrenamiento.

Los datos fueron divididos de manera uniforme para todos los modelos analizados, asignando el 64% del conjunto a entrenamiento (896 imágenes), el 20% a testeo (280 imágenes) y el 16% a validación (224 imágenes). Para el entrenamiento de los modelos, se establecieron los siguientes parámetros: El tamaño del lote (batch size) se fijó en 32, valor que contribuye a mitigar el sobreajuste en las primeras etapas del entrenamiento y a mejorar la eficiencia computacional. La resolución de entrada de las imágenes se estableció en 640×640 píxeles, en concordancia con la arquitectura YOLO, que reescala uniformemente las imágenes de mayor tamaño a esta dimensión. La tasa de aprendizaje inicial (lr0) y final (lrf) se definieron en 0.01. El parámetro de regularización weight decay se establecío en 0.0005 y el Momentum en 0.937. El umbral Intersection over Union (IoU) se estableció en 0.7. En cuanto a

las épocas, se establecieron en 300 épocas de entrenamiento para todas las arquitecturas, activando el Early Stopping para evitar el sobreajuste. Este límite se definió tras observar en experimentos previos que los resultados se estabilizaban alrededor de las 100 épocas, brindando un margen de aprendizaje sin sobreentrenamiento. El Early Stopping es una técnica que detiene el entrenamiento automáticamente cuando no se observan mejoras en la pérdida del conjunto de validación durante un número consecutivo de épocas, lo que permite evitar el sobreajuste y ahorrar tiempo de procesamiento. Este comportamiento se controla mediante el parámetro patience, que se configuró en 20 épocas, un valor que brinda suficiente flexibilidad para que el modelo se estabilice sin extender innecesariamente el entrenamiento. Los demás hiperparámetros utilizados han sido los definidos por el modelo por defecto estos son recomendados por [28].

Para el entrenamiento se utilizó un Procesador AMD EPYC 7H12 (2,595 GHz), GPU NVIDIA Tesla V100, Memoria RAM de 64 GB, el entorno de aceleración fue CUDA 12.4, implementando en Python 3.10.15, PyTorch 2.5.1 y Torchvision 0.20.1.

3. Resultados y Discusión

3.1. Matrices de confusión

El modelo YOLOv9s ha mostrado un desempeño robusto en la detección de diversas clases, con especial énfasis en la clase "maíz". Según la matriz de confusión (Figura 3), el modelo logra 663 verdaderos positivos para "maíz", lo que demuestra su capacidad para identificar correctamente la mayoría de las instancias de esta clase. No obstante, presenta algunos errores, como 66 falsos positivos (FP) asociados al fondo "background" y 21 falsos negativos (FN), donde las instancias reales de maíz no son detectadas, clasificándose como fondo. Estos resultados se traducen en una precisión de 0.909 y un recall de 0.969, lo que indica un buen rendimiento en la clasificación de "maíz". En la matriz de confusión normalizada (Figura 4), el modelo presenta un excelente desempeño, con el 97% de las instancias correctamente clasificadas como "maíz", aunque se observa un 0.29% de falsos positivos, lo que refleja la presencia de algunas instancias del fondo erróneamente clasificadas como "maíz".

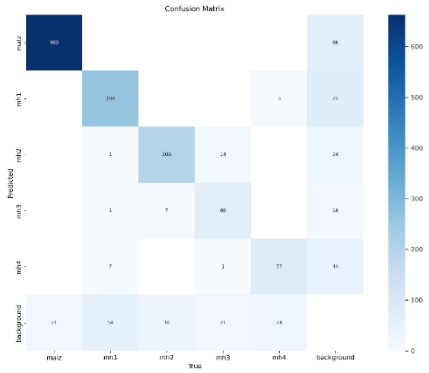


Figura 3. Matriz de confusión en valores absolutos para el modelo YOLOv9s.

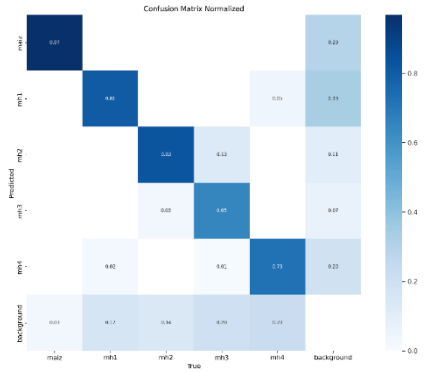


Figura 4. Matriz de confusión Normalizada para el modelo YOLOv9s.

En cuanto a la detección de otras clases, como "mh1", el modelo presenta un desempeño mixto. Para "mh1", el modelo identifica correctamente 264 instancias, pero también se reportan 75 falsos positivos y 54 falsos negativos, lo que resulta en una precisión de 0.779 y un recall de 0.830. Los datos normalizados muestran que el modelo clasifica correctamente el 80.7% de las instancias de "mh1", pero aún presenta un 16.5% de falsos negativos, lo que indica un área de mejora en la detección de esta clase. Además, hay una confusión del 4.7% con la clase "mh4", lo que sugiere que las similitudes visuales entre estas clases podrían dificultar su correcta clasificación. Para la clase "mh2", el modelo muestra una precisión de 0.893 y un recall de 0.855, con 200 verdaderos positivos. Sin embargo, también se reportan 24 falsos positivos y 34 falsos negativos. La clase "mh2" tiene un buen desempeño, pero la confusión con otras clases como "mh3" (13.5%) y el fondo (10.7%) revela que aún hay margen para mejorar la diferenciación entre estas clases. Por otro lado, la clase "mh3" presenta un rendimiento limitado, con solo 68 verdaderos positivos, lo que indica que el modelo tiene dificultades para identificar correctamente esta clase. Además, presenta una alta tasa de falsos positivos (16) y falsos negativos (21), lo que se traduce en una precisión de 0.810 y un recall de 0.764. Los resultados de la matriz de confusión normalizada (Figura 4) muestran que solo el 65.4% de las instancias fueron clasificadas correctamente, con una significativa confusión con el fondo (20%) y la clase "mh2" (13.5%). Finalmente, para la clase "mh4", el modelo alcanza 77 verdaderos positivos, con 44 falsos positivos y 24 falsos negativos, lo que da como resultado una precisión de 0.636 y un recall de 0.762. La matriz normalizada indica que, aunque el modelo clasifica correctamente el 72.6% de las instancias de "mh4", aún existe un margen de mejora en la detección de esta clase, particularmente en la reducción de falsos positivos y negativos

El modelo RT-DETR-l ha demostrado un rendimiento competente en la identificación de varias clases, con un desempeño destacado en la clase “maíz”. Según la matriz de confusión en valores absolutos (Figura 5), el modelo identificó correctamente 671

verdaderos positivos, pero generó 219 falsos positivos “background FP” y 12 falsos negativos “background FN”. Esto resultó en una precisión de 0.754 y un recall de 0.982, lo que indica una alta capacidad para detectar instancias de “maíz”, aunque con un costo en precisión debido a los falsos positivos. La matriz de confusión normalizada (Figura 6) muestra que el 98.1% de las instancias de “maíz” fueron correctamente clasificadas, con un 1.9% de confusión, principalmente con el “background”. Estos resultados sugieren que, aunque el modelo tiene un excelente recall, la tasa elevada de falsos positivos impacta negativamente en su precisión.

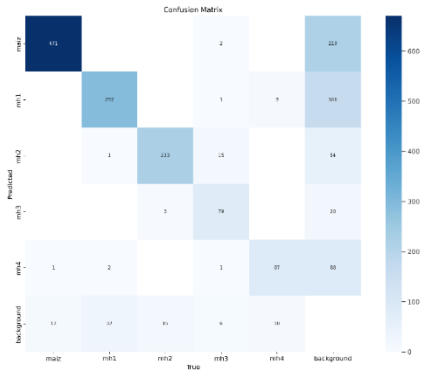


Figura 5. Matriz de confusión en valores absolutos para el modelo RT DETR-l.

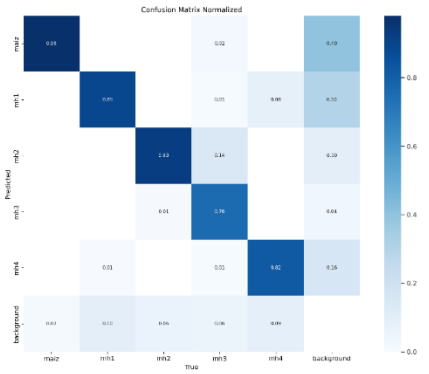


Figura 6. Matriz de confusión Normalizada para el modelo RT DETR-l.

En la detección de la clase “mh1”, el modelo RT-DETR-l identificó 292 verdaderos positivos, pero también cometió 166 falsos positivos y 32 falsos negativos, lo que resultó en una precisión de 0.637 y un recall de 0.901. Aunque el modelo es capaz de identificar correctamente la mayoría de las instancias, los falsos positivos continúan siendo un desafío. Según los datos normalizados (Figura 6), el 89.3% de las instancias de “mh1” fueron clasificadas correctamente, con un 10.7% de errores, que se distribuyen principalmente entre “background” y, en menor medida, “maíz” o “mh4”. Este desempeño refleja un buen balance entre precisión y recall, aunque los falsos positivos siguen siendo una limitación importante.

Para las clases “mh2” y “mh3”, el modelo RT-DETR-l también muestra un desempeño sólido, con 223 y 79 verdaderos positivos, respectivamente. En la clase “mh2”, el modelo alcanzó una precisión de 0.805 y un recall de 0.937, mientras que en “mh3” obtuvo una precisión de 0.798 y un recall de 0.929. En ambos casos, la matriz de confusión normalizada (Figura 6) muestra un buen rendimiento, con el 92.5% de las instancias de “mh2” y el 76.0% de las de “mh3” correctamente clasificadas. Sin embargo, la confusión con el “background” y otras clases, como “mh2” y “mh3” en la detección de “mh3”, indica que hay áreas de mejora. Por último, en la clase “mh4”, aunque el modelo identificó 87 verdaderos positivos, la presencia de 88 falsos positivos y 10 falsos negativos resultó en una precisión de 0.497 y un recall de 0.897.

Los datos normalizados muestran que el 82.1% de las instancias de “mh4” fueron correctamente clasificadas, pero un 17.9% de los errores se distribuyeron entre “background” y “mh1”, lo que refleja la necesidad de mejorar la precisión en esta clase.

3.2. Curvas Precision-Recall y F1-score – Confidence

La curva Precision-Recall es una métrica clave para evaluar modelos de clasificación en conjuntos de datos desbalanceados, representando la relación entre precisión y recall para distintos umbrales. Una curva más alta y desplazada hacia la derecha indica un mejor rendimiento. En las Figuras 7 y 8 se presentan las curvas de los modelos evaluados, calculando el mAP por clase con un IoU de 0.5, donde una predicción es correcta si la superposición es al menos del 50%. Además, se obtiene el mAP@0.5 promedio para todas las clases, proporcionando una métrica general del desempeño del modelo.

La curva F1-score – Confidence evalúa el rendimiento de modelos de clasificación en función de los umbrales de confianza, mostrando cómo varía el F1-score, que equilibra precisión y recall, a distintos niveles de confianza. Este análisis permite determinar umbrales óptimos que maximizan el desempeño del modelo en un conjunto multiclase. En las Figuras 9 y 10, se presentan las curvas de los modelos evaluados, indicando los umbrales de confianza óptimos y el F1-score general, lo que facilita ajustes para mejorar la precisión y recall de cada clase.

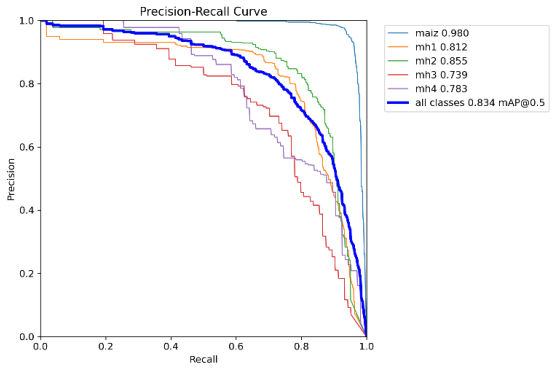


Figura 7. Curva Precision-Recall para YOLOv9s.

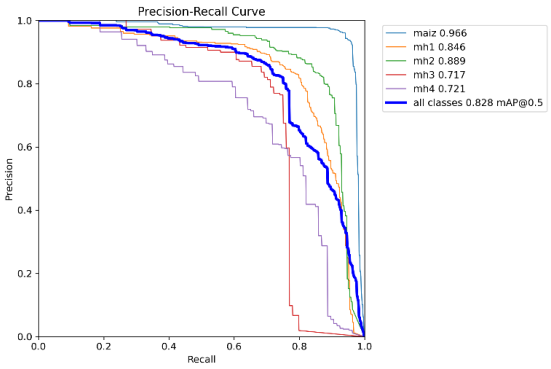


Figura 8. Curva Precision-Recall para RT DETR-l.

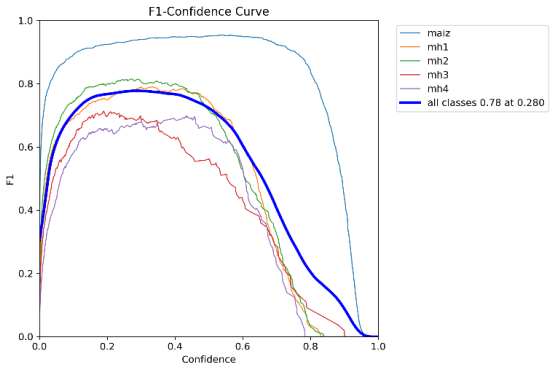


Figura 9. Curva F1 – Confidence para YOLOv9s.

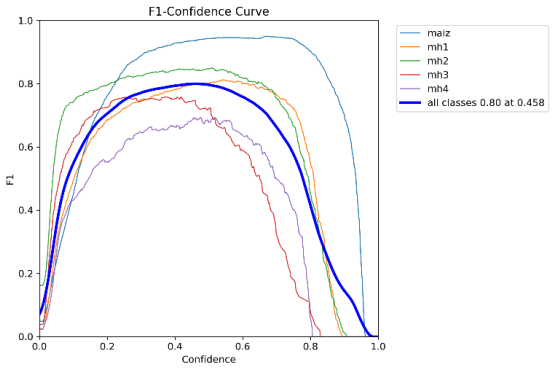


Figura 10. Curva F1 – Confidence para RT DETR-l.

La tabla 1 muestra los valores de mAP@0.5 calculados a partir de las gráficas Precisión-Recall para los dos modelos, estos valores indican el rendimiento promedio de cada modelo para cada clase y para todas las clases combinadas, cuanto mayor sea el valor de mAP@0.5, mejor será el rendimiento del modelo, adicionalmente se muestra los Valores de F1 -score para los umbrales de confianza balanceados de los modelos analizados.

Tabla 1. Valores de mAP@0.5, F1-score y umbral de confianza para los modelos analizados, por clase.

Modelos	***maiz***	***mh1***	***mh2***	***mh3***	***mh4***	***General***	***F1-score***	***Umbral de Confianza***
YOLOv9s	**0,980**	0,812	0,855	**0,739**	**0,783**	**0,834**	0,78	0,28
RT DETR-l	0,966	**0,846**	**0,889**	0,717	0,721	0,828	**0,80**	**0,458**

Para la clase “maíz” el mayor rendimiento se obtuvo con el modelo YOLOv9s con 0.980 de mAP@0.5, el modelo RT DETR-l obtuvo un 0.966, un 1.43% menor. En cuanto a la clase “mh1” el mejor modelo fue RT DETR-l con 0.846, mientras que YOLOv9s obtuvo un 0.812 presentando una ligera caída, posiblemente debido a confusiones con otras clases. La clase “mh2” obtuvo el mejor rendimiento con el modelo RT DETR-l con 0.889, YOLOv9s obtuvo un 0.855. La clase “mh3” el modelo con mayor rendimiento fue YOLOv9s con 0.739, y RT DETR-l con 0.717 que son valores similares entre ellos, esta clase presenta el mayor desafío para los dos modelos, ya que, son los valores más bajos presentados para todas las clases. La clase “mh4” el modelo de mayor rendimiento fue YOLOv9s con 0.783, y RT DETR-l con 0.721. En cuanto al rendimiento general del modelo el de mayor rendimiento fue YOLOv9s con 0.834, mientras que el modelo RT DETR-l obtuvo un 0.828 mostrando superioridad en las clases “mh1” y “mh2”. El modelo RT DETR-l es el de mayor rendimiento general, alcanzando el F1-Score más alto de 0.80, su umbral de confianza es más alto de 0.458, lo que sugiere que este modelo es más conservador, manteniendo un buen balance global, pero a costa de tener mayor número de falsos

positivos. El modelo YOLOv9s obtuvo un F1-Score de 0.78, pero con un umbral de confianza significativamente menor de 0.280, esto sugiere que el modelo es más agresivo en detectar positivos.

3.3. Inferencia de los modelos YOLOv9s y RT DETR-l

En las inferencias realizadas a los 15 días después de la siembra, los modelos YOLOv9s y RT DETR-l muestran un buen desempeño en la detección de las plantas de maíz y las malezas. En la Figura 11, el modelo YOLOv9s identifica correctamente las plantas de maíz con probabilidades de 0.81 y también detecta varias instancias de malezas como “mh1”, “mh2” y “mh4”, aunque confunde algunas de las malezas “mh3” con “mh2”. Por su parte, el modelo RT DETR-l, como se muestra en la Figura 12, también identifica todas las plantas de maíz con probabilidades superiores a 0.80 y detecta más instancias de la maleza “mh1” que YOLOv9s, incluso separando correctamente una de ellas en dos objetos distintos. Además, ambos modelos presentan dificultades similares en la detección de “mh3”, sin lograr identificarla en esta etapa. A los 30 días después de la siembra, en la Figura 13, el modelo YOLOv9s mejora la detección de las malezas, identificando las clases “mh1” y “mh2” con mayor precisión, y reconociendo correctamente las malezas “mh3” en esta etapa avanzada de crecimiento. Por otro lado, en la Figura 14, el modelo RT DETR-l también muestra una detección precisa de las plantas de maíz y una identificación más exhaustiva de las malezas, con un mayor número de detecciones de “mh1” y “mh4” en comparación con YOLOv9s.

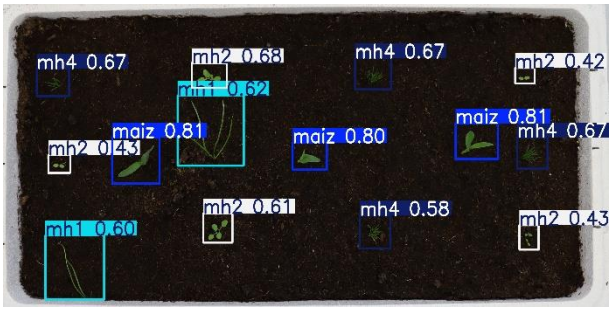


Figura 11. Inferencia modelo YOLOv9s a 15 días después de la siembra

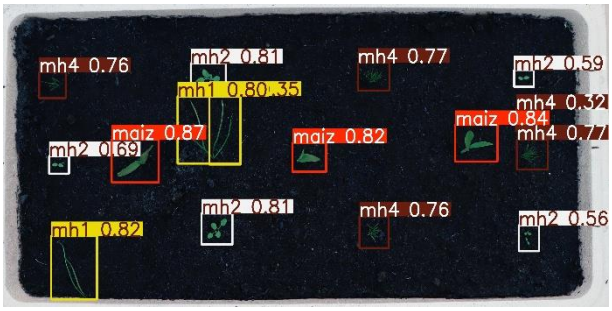


Figura 12. Inferencia modelo RT DETR-l a 15 días después de la siembra

Figura 13. Inferencia modelo YOLOv9s a 30 días después de la siembra

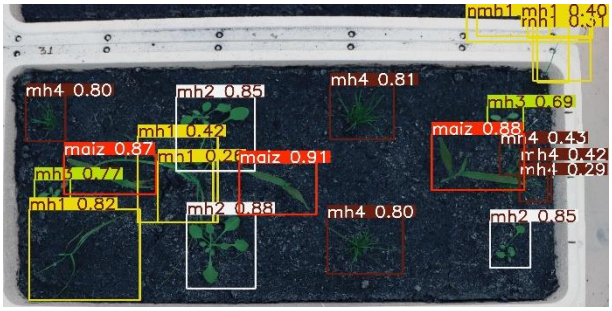


Figura 14. Inferencia modelo RT DETR-l a 30 días después de la siembra

Ambos modelos logran identificar adecuadamente las malezas y diferenciarlas de las plantas de maíz, lo que los hace adecuados para su implementación en sistemas de escarda de precisión, a pesar de las pequeñas diferencias en el rendimiento de cada uno.

5. Conclusiones

Los modelos YOLOv9s y RT DETR-l fueron evaluados para la detección de malezas en el cultivo de maíz dulce (*Zea Maiz L*.), para lo cual, se usaron cuatro tipos de malezas *Lolium Rigidum* "mh1", *Sonchus Oleraceus* "mh2", *Saolanun* Nigrum "mh3" y Poa Annua "mh4". Ambos modelos mostraron un desempeño destacable, aunque con características diferenciadas. YOLOv9s demostró ser un modelo altamente sensible y eficiente, con rápida convergencia y notable capacidad de detección, lo que lo hace especialmente útil en escenarios que requieren identificación temprana de malezas, incluso bajo condiciones ambientales variables. Esto lo convierte en una alternativa valiosa para aplicaciones en tiempo real y sistemas móviles de monitoreo agrícola. Por su parte, el modelo RT-DETR-l presentó un mejor equilibrio entre precisión y exhaustividad, posicionándose como la opción más adecuada para contextos donde la minimización de falsos positivos es crítica, su comportamiento más conservador favorece una detección más confiable y robusta. En función de los resultados, se recomienda emplear YOLOv9s en tareas de monitoreo continuo o intervención temprana dentro de programas de manejo integrado de malezas. Como trabajo futuro, se integrará al proceso de entrenamiento técnicas de Data Augmentation para aumentar la cantidad de muestras en las clases menos representadas y desbalanceadas, con el objetivo de mejorar el desempeño en estas categorías que obtuvieron resultados insuficientes. También se incorporarán nuevas imágenes de nuevas campañas, tomadas en diversas condiciones de campo, diferentes estados fenológicos y capturadas con diferentes dispositivos, como drones y cámaras montadas en maquinaria agrícola. Esto permitirá robustecer los modelos de CNNs entrenados, seleccionando la mejor CNN para integrarla a un sistema de escarda de precisión altamente eficiente, capaz de operar en entornos agrestes de campo y manejar la variabilidad inherente a las diferentes condiciones de la producción agrícola.

Author Contributions:
Conceptualization, O.L.G.-N., A.B., and L.M.N.-G.; methodology, O.L.G.-N., A.B., J.M.-G., J.H.C.-T. and L.M.N.-G.; software, O.L.G.-N. and A.B.; validation, O.L.G.-N. and A.B.; formal analysis, O.L.G.-N., A.B. and L.M.N.-G.; investigation, O.L.G.-N., J.M.-G., J.H.C.-T. and L.M.N.-G.; resources, L.M.N.-G.; writing—original draft preparation, O.L.G.-N. and L.M.N.-G.; writing—review and editing, O.L.G.-N., A.B., J.H.C.-T. and L.M.N.-G.; supervision, A.B., J.H.C.-T. and L.M.N.-G.; project administration, L.M.N.-G.; funding acquisition, L.M.N.-G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been funded by the European Union through the Agroecological Strategies for resilient farming in West Africa CIRAWA project HEEU-101084398.
Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.
Acknowledgments: The authors would like to thank Research Group TADRUS of the Department of Agricultural and Forestry Engineering, University of Valladolid.
Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Referencias

1. FAO *FAO Statistical Yearbook – World Food and Agriculture*; FAO, Ed.; ISBN 978-92-5-139255-3: Rome, Italy ;, 2024;
2. Rajcan, I.; Swanton, C.J. Understanding Maize–Weed Competition: Resource Competition, Light Quality and the Whole Plant. *Field Crops Res* **2001**, *71*, 139–150, doi:10.1016/S0378-4290(01)00159-9.
3. Iqbal, N.; Manalil, S.; Chauhan, B.S.; Adkins, S.W. Investigation of Alternate Herbicides for Effective Weed Management in Glyphosate-Tolerant Cotton. *Arch Agron Soil Sci* **2019**, *65*, 1885–1899, doi:10.1080/03650340.2019.1579904.
4. Vìi, M.; Williamson, M.; Lonsdale, M. Competition Experiments on Alien Weeds with Crops: Lessons for Measuring Plant Invasion Impact?; 2004; Vol. 6;.
5. Holt, J.S. Principles of Weed Management in Agroecosystems and Wildlands. *Weed Technology* **2004**, *18*, 1559 – 1562, doi:10.1614/0890-037X(2004)018[1559:POWMIA]2.0.CO;2.
6. Vocaturo, E.; Rani, G.; Dhaka, V.S.; Zumpano, E. AI-Driven Agriculture: Opportunities and Challenges. In Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Big Data (BigData); IEEE, December 15 2023; pp. 3530–3537.
7. Liu, W.; Xu, L.; Xing, J.; Shi, L.; Gao, Z.; Yuan, Q. Research Status of Mechanical Intra-Row Weed Control in Row Crops. *Journal of Agricultural Mechanization Research* **2017**, *33*, 243–250.
8. Radoglou-Grammatikis, P.; Sarigiannidis, P.; Lagkas, T.; Moscholios, I. A Compilation of UAV Applications for Precision Agriculture. *Computer Networks* **2020**, *172*, 107148, doi:10.1016/j.comnet.2020.107148.
9. Liu, B.; Bruch, R. Weed Detection for Selective Spraying: A Review. *Current Robotics Reports* **2020**, *1*, 19–26, doi:10.1007/s43154-020-00001-w.
10. Subeesh, A.; Bhole, S.; Singh, K.; Chandel, N.S.; Rajwade, Y.A.; Rao, K.V.R.; Kumar, S.P.; Jat, D. Deep Convolutional Neural Network Models for Weed Detection in Polyhouse Grown Bell Peppers. *Artificial Intelligence in Agriculture* **2022**, *6*, 47–54, doi:10.1016/j.aiia.2022.01.002.
11. Wu, H.; Wang, Y.; Zhao, P.; Qian, M. Small-Target Weed-Detection Model Based on YOLO-V4 with Improved Backbone and Neck Structures. *Precis Agric* **2023**, *24*, 2149–2170, doi:10.1007/s11119-023-10035-7.
12. Hasan, A.S.M.M.; Sohel, F.; Diepeveen, D.; Laga, H.; Jones, M.G.K. A Survey of Deep Learning Techniques for Weed Detection from Images. *Comput Electron Agric* **2021**, *184*, 106067, doi:10.1016/j.compag.2021.106067.
13. Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A. *Deep Learning*; MIT Press, 2016;
14. Al-Badri, A.H.; Ismail, N.A.; Al-Dulaimi, K.; Salman, G.A.; Khan, A.R.; Al-Sabaawi, A.; Salam, M.S.H. Classification of Weed Using Machine Learning Techniques: A Review-Challenges, Current and Future Potential Techniques. *JOURNAL OF PLANT DISEASES AND PROTECTION* **2022**, *129*, 745–768, doi:10.1007/s41348-022-00612-9.
15. Chen, D.; Lu, Y.; Li, Z.; Young, S. Performance Evaluation of Deep Transfer Learning on Multi-Class Identification of Common Weed Species in Cotton Production Systems. *Comput Electron Agric* **2022**, *198*, 107091, doi:10.1016/j.compag.2022.107091.
16. Olsen, A.; Konovalov, D.A.; Philippa, B.; Ridd, P.; Wood, J.C.; Johns, J.; Banks, W.; Girgenti, B.; Kenny, O.; Whinney, J.; et al. DeepWeeds: A Multiclass Weed Species Image Dataset for Deep Learning. *Sci Rep* **2019**, *9*, 2058, doi:10.1038/s41598-018-38343-3.
17. Suh, H.K.; IJsselmuiden, J.; Hofstee, J.W.; van Henten, E.J. Transfer Learning for the Classification of Sugar Beet and Volunteer Potato under Field Conditions. *Biosyst Eng* **2018**, *174*, 50–65, doi:10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2018.06.017.

18. García-Navarrete, O.L.; Correa-Guimaraes, A.; Navas-Gracia, L.M. Application of Convolutional Neural Networks in Weed Detection and Identification: A Systematic Review. *Agriculture (Switzerland)* 2024, *14*.
19. Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. **2015**.
20. Wang, C.-Y.; Yeh, I.-H.; Liao, H.-Y.M. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information. **2024**.
21. García-Navarrete, O.L.; Camacho-Tamayo, J.H.; Bregon, A.B.; Martín-García, J.; Navas-Gracia, L.M. Performance Analysis of Real-Time Detection Transformer and You Only Look Once Models for Weed Detection in Maize Cultivation. *Agronomy* **2025**, *15*, 796, doi:10.3390/agronomy15040796.
22. Carion, N.; Massa, F.; Synnaeve, G.; Usunier, N.; Kirillov, A.; Zagoruyko, S. End-to-End Object Detection with Transformers. **2020**.
23. Zhao, Y.; Lv, W.; Xu, S.; Wei, J.; Wang, G.; Dang, Q.; Liu, Y.; Chen, J. DETRs Beat YOLOs on Real-Time Object Detection. **2023**.
24. MYERS, M.W.; CURRAN, W.S.; VANGESSEL, M.J.; MAJEK, B.A.; SCOTT, B.A.; MORTENSEN, D.A.; CALVIN, D.D.; KARSTEN, H.D.; ROTH, G.W. The Effect of Weed Density and Application Timing on Weed Control and Corn Grain Yield 1. *Weed Technology* **2005**, *19*, 102–107, doi:10.1614/WT-03-263R.
25. Wang, B.; Yan, Y.; Lan, Y.; Wang, M.; Bian, Z. Accurate Detection and Precision Spraying of Corn and Weeds Using the Improved YOLOv5 Model. *IEEE Access* **2023**, *11*, 29868–29882, doi:10.1109/ACCESS.2023.3258439.
26. Dang, F.; Chen, D.; Lu, Y.; Li, Z. YOLOWeeds: A Novel Benchmark of YOLO Object Detectors for Multi-Class Weed Detection in Cotton Production Systems. *Comput Electron Agric* **2023**, *205*, doi:10.1016/j.compag.2023.107655.
27. García-Navarrete, O.L.; Santamaria, O.; Martín-Ramos, P.; Valenzuela-Mahecha, M.Á.; Navas-Gracia, L.M. Development of a Detection System for Types of Weeds in Maize (Zea Mays L.) under Greenhouse Conditions Using the YOLOv5 v7.0 Model. *Agriculture* **2024**, *14*, 286, doi:10.3390/agriculture14020286.
28. Jocher, G.; Chaurasia, A.; Stoken, A.; Borovec, J.; NanoCode012; Kwon, Y.; Michael, K.; TaoXie; Fang, J.; imyhxy; et al. Ultralytics/Yolov5: V7.0 - YOLOv5 SOTA Realtime Instance Segmentation. **2022**, doi:10.5281/ZENODO.7347926.

Selección y caracterización de un material inerte para los ensayos de inspección en aplicadores de gránulo

Carmen Jarén[1,2*], Txuma Mangado[1], Ainara López-Maestresalas[1,2], Pedro Arnal[1], Carmen González[3] y Silvia Arazuri[1,2]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra (UPNA), España;

[2] Instituto de Innovación y Sostenibilidad en la Cadena Agroalimentaria (ISFOOD), Universidad Pública de Navarra, España;

[3] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Gobierno de España.

* cjaren@unavarra.es

Resumen: La Directiva 2009/128/CE exige la inspección de todas las máquinas de aplicación de productos fitosanitarios. Para cumplir con dicho requerimiento se han elaborado una serie de normas. Sin embargo, los equipos de aplicación de fitosanitarios granulados aún no están contemplados en dicha normativa. Para abordar esta carencia, el MAPA publicó una guía específica que requiere el uso de un material inerte capaz de simular el comportamiento de los gránulos sin contener materia activa. El objetivo de este trabajo es buscar un posible material sólido e inerte, adecuado para ser utilizarlo en las inspecciones de los equipos. Para ello, se seleccionaron diversos materiales que se caracterizaron en el laboratorio. Se evaluaron mediante ensayos de dosificación y distribución con un aplicador manual, en tres posiciones del dosificador diferentes. Algunos materiales se descartaron por su dificultad para ser ensayados o por sus características físicas. A partir de los resultados obtenidos, la sepiolita fue el material que mejor se comportó. La selección de un material inerte adecuado facilitará la implementación de la guía de inspección de aplicadores de fitosanitarios granulados, permitiendo una evaluación fiable de los equipos sin riesgos ambientales.

Palabras clave: Fitosanitarios**;** Inspección; Normativa; Directiva 2009/128/CE; ITEAF; Distribución; Dosificación; Fluidez; Estandarización; Impacto ambiental.

1. Introducción

Según la Directiva 2009/128/CE [1], sobre el Uso Sostenible de los Plaguicidas, todos los tipos de máquinas utilizadas para la aplicación de plaguicidas deben ser inspeccionados, no solo las que aplican líquidos, sino también las máquinas utilizadas para aplicar plaguicidas de forma sólida, los denominados gránulos. Para cumplir con los requerimientos medioambientales exigidos por la Unión Europea, se han elaborado una serie de normas armonizadas UNE EN ISO 16119 [2]. Sin embargo, estas normas no incluyen los aplicadores de productos fitosanitarios granulados que, sin embargo, se utilizan ampliamente en toda la Unión Europea. Por ello, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España, en colaboración con el Laboratorio Nacional de Referencia para las inspecciones

técnicas de equipos de aplicación de productos fitosanitarios (ITEAF) y el Grupo de Investigación Mecatrónica Agraria de la Universidad Pública de Navarra, elaboró una "Guía de inspección de equipos de aplicación de granulado" [3]. Dicha guía cubre todas las inspecciones relevantes para este tipo de máquinas.

Los fitosanitarios granulados son productos sólidos (gránulos, pellets o microgránulos). Al ser una aplicación seca, se presentan como una alternativa a la formulación líquida. Los sólidos presentan una serie de ventajas frente a los líquidos: reducen la toxicidad de la materia activa para las personas y para el medio ambiente, no forma gotas que puedan sufrir deriva y no moja a las plantas. Habitualmente se utilizan para el control de plagas que se encuentran en el suelo. Su fabricación se hace mediante la impregnación, o el recubrimiento, de gránulos inertes (materia portadora) con la materia activa. El tamaño de estos gránulos está definido en el Catálogo de tipos de formulación de pesticidas y sistema de codificación publicado por *CropLife International* [4]. En este catálogo se define 'Gránulo' (GR) como la formulación sólida de flujo libre de un rango de tamaño de gránulos definido, lista para su uso. Este término sustituye a la codificación antigua en la que se definían distintos formulados:

- MG Microgránulo: gránulo de tamaño de partícula en el rango de 100 a 600 µm.
- GG Macrogránulo: gránulo de tamaño de partícula en el rango de 2000 a 6000 µm.
- FG Gránulo fino: gránulo de tamaño de partícula en el rango de 300 a 2500 µm.

Esta codificación, además, se incluye en la documentación técnica para el registro de plaguicidas publicados por la OECD en el apartado de formulación y codificación [5].

Por otra parte, los equipos de aplicación de gránulo pueden ser de dos tipos. El primero de ellos es el localizador en bandas o líneas de gránulos (Tipo A) y el segundo es el distribuidor de gránulos a voleo (Tipo B) [6]. Los equipos localizadores de gránulos suelen ir asociados a las sembradoras monograno. Estas máquinas han sido estudiadas y construidas, especialmente, para distribuir una masa precisa de materia activa sobre el lecho de germinación y de una forma regular, bien en toda la superficie o bien en bandas estrechas. La materia activa se libera después progresivamente durante el desarrollo de las plantas. Los distribuidores de gránulos son equipos sencillos que se componen de una tolva pequeña provista en su fondo de un dosificador que puede ser de cilindro acanalado, de válvula deslizante, de tornillo sinfín, de alveolos oblicuos o de celdillas o cazoletas. En todos los casos, los dosificadores son accionados por un eje común a todos ellos. Este accionamiento se realiza bien desde el sistema de distribución de la sembradora o

bien mediante un conjunto específico para este fin. La dosificación debe ser proporcional al avance y regulable mediante el cambio de poleas o de piñones.

Una vez que el gránulo ha sido dosificado es transportado hasta la zona a tratar. Este transporte se efectúa, en la mayoría de los casos, por gravedad, aunque también puede hacerse con transporte neumático por presión de aire, siendo aspirados los gránulos por efecto Venturi a la salida de los dosificadores. Al final del conducto de transporte hay un ciclón para separar los gránulos de la corriente de aire, depositándose estos en el suelo por gravedad. En muchos casos, la salida del dosificador se desdobla en dos tubos de descenso, de forma que los gránulos se localizan en dos líneas, a un lado y otro de la línea de siembra.

Para una correcta aplicación de productos fitosanitarios sólidos es imprescindible realizar una distribución homogénea del producto, de acuerdo con las dosis recomendadas y autorizadas, con el fin de evitar efectos nocivos o perjudiciales en la salud humana y el medio ambiente. La Directiva 2009/128/CE [1] establece determinados requisitos de obligado cumplimiento para garantizar un uso sostenible de los Plaguicidas. Por otra parte, la Ley 43/2002, de 20 de noviembre [7], pretende garantizar un uso racional de los mismos. Para dar cumplimiento a esta normativa, el 18 de noviembre de 2011, se publicó el Real Decreto 1702/2011 sobre las inspecciones obligatorias de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios [8].

Para realizar esas inspecciones se debe utilizar un material inerte que, en el caso de la aplicación de productos fitosanitarios líquidos es agua, pero nada se indica sobre el material inerte para sólidos. Esta duda fue planteada por algunas ITEAF al Laboratorio Nacional de Referencia para las inspecciones de equipos de aplicación de productos fitosanitarios que, a su vez, fue remitida al Grupo de Investigación de Mecatrónica Agraria como autores de la actual Guía para la inspección de dichas máquinas [3]. Para poder dar respuesta a esta cuestión, se plantea el siguiente objetivo: seleccionar, caracterizar y ensayar varios materiales sólidos inertes de tal manera que se pueda recomendar, con unas ciertas garantías, un material inerte, que permita hacer las inspecciones técnicas a los equipos de aplicación de fitosanitarios granulados.

2. Materiales y Métodos

2.1. Selección del material y caracterización

Como referencia inicial se tuvieron en cuenta los materiales que propone la norma ISO 8524: 1986 [9] y las recomendaciones del SPISE *Technical Working Group 9* [10], en la que se incluyen las siguientes características:

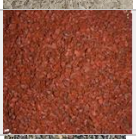
- Piedra pómez: mala calidad del flujo, rugosa, gruesa, dura. Densidad aparente: aproximadamente 0,4 g/cm3. Tamaño del gránulo: 1,0 a 1,6 mm para más del 85% de la masa.
- Cuarzo: buena calidad del flujo, redondeado, granulo fino, duro, pesado. Densidad aparente: aproximadamente 1,4 g/ cm3. Tamaño del gránulo: 0,5 a 1,0 mm para más del 85% de la masa.
- Calcita: distribución amplia de tamaños de gránulo, pesada, blanda. Densidad aparente: aproximadamente 1,4 g/ cm3. Tamaño del gránulo: 0,4 a 1,0 mm para más del 85% de la masa.
- Yeso: buena calidad del flujo, redondeado, blando. Densidad aparente: aproximadamente 0,9 g/cm3. Tamaño del gránulo: 0,4 a 0,9 mm para más del 85% de la masa.

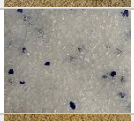
Tomando esta información, se seleccionaron una serie de materiales inertes en gránulos que cumplieran con las siguientes características:

- Densidad aparente: 0,4 a 1,4 g/cm^3
- Tamaño de los gránulos: 0,15 a 8 mm
- Poco abrasivo

Aunque en un principio se sopesó que, además, el material fuera hidrofóbico, finalmente se desechó ya que los productos fitosanitarios granulados no lo son. Sin embargo, el hecho de serlo será siempre una ventaja. Por otra parte, también se consideró otro criterio a tener en cuenta, el precio del producto por kg. Los materiales seleccionados y sus características se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los materiales inertes.

Material	Marca comercial	Precio (€/kg)	Granulometría (mm)	Dureza	Hidrofilia	Abrasivo	Foto
Arena Amarilla	Deco. Eurosand	1,59	2-3	>10	No	Sí	
Arena blanca	Deco. Eurosand	1,8	0,1-0,5	>10	No	Sí	
Arena de sílice	Arisac	0,31	0,1-0,5	>10	No	SI	
Arroz		1,72			Si	No	
Caucho	Agrogardening	0,8		<1	No	No	
Crotalaria		11		>10	Sí	No	

Cuscús		3,62			Sí	No	
Gel de sílice	Single	2,3	0,2-6	4,5	Sí	No	
Maravilla		1,64	0,25-2	8	Sí	No	
Sepiolita	Tolsa	0,66			Sí	No	
Vidrio filtrante	Axton	0,9	0,6-1,2	>10	No	No	

Los materiales seleccionados fueron:

- Arena o granilla decorativa amarilla, de granulometría de 2-3 mm.
- Arena o granilla decorativa blanca, de granulometría de 0,1-0,5 mm.
- Arena de sílice, de granulometría de 0,1-0,5 mm.
- Arroz comercial.
- Caucho granulado procedente en un 100 % de neumáticos reciclados, compuestos a su vez por una mezcla de caucho natural y de caucho sintético [11]. El que se ensayó era rojo, aunque el negro es más económico. No es nada abrasivo y es hidrófobo.
- Crotalaria. Semillas fabáceas de pequeño tamaño.
- Cuscús. Sémola de trigo duro de pequeño tamaño
- Maravilla. Sémola de trigo duro en forma de bolitas de pequeño tamaño para sopas.
- Gel de sílice. Arena para gatos, de granulometría aceptable aunque muy heterogéneo, no muy duro, ni muy abrasivo, aunque es hidrofílico.
- Sepiolita 30-60. Material inerte que forma parte de la composición del granulado de algunos fitosanitarios. Es un filosilicato blando, de dureza 2 en la escala de Mohs, muy poroso y absorbente [12].
- Vidrio filtrante de 0,6-1,2 mm, respetuoso con el medio ambiente y fabricado a partir de vidrio industrial reciclado. No es muy abrasivo y es hidrófobo.

Para completar la información que se disponía de los materiales seleccionados, a alguno de ello se le determinó en el laboratorio su densidad, su granulometría y su dureza. La granulometría se determinó utilizando diferentes cribas y determinando el porcentaje del material en cada una de las siguientes categorías: 4,75; 4,75-3,30; 3,30-2; <2 mm. En el caso de la arena de sílice, como el tamaño era inferior a 2 mm, se usaron cribas de 0,1, 0,25 y 0,5 mm. Para la determinación de la dureza se utilizó el durómetro para abono granulado de AMMS-Ibérica.

2.2. Comportamiento del material

Para evaluar el comportamiento de los materiales en una máquina, se ensayaron todos ellos en una sembradora aplicadora manual. Cada uno de los materiales caracterizados se colocó en la tolva y se ensayó para tres aperturas diferentes del dosificador: la menor, la mayor y una intermedia. A velocidad constante, se realizó la distribución del material dando 10 vueltas al dosificador. La cantidad de materia aplicada, se recogió y se pesó en una balanza de precisión. Para cada material y cada posición del dosificador, se realizaron 10 repeticiones. Se determinó su uniformidad y el comportamiento de los materiales.

2.3. Análisis de datos

El análisis de datos se realizó con el programa RStudio v. 1.4.1106. Se calculó para cada material la media, la desviación típica, los intervalos de confianza del 90%, y los coeficientes de variación. Y se analizaron los datos de repetibilidad y reproducibilidad. La repetibilidad de la muestra se realizó siguiendo la metodología propuesta por Harper [13]. Con el fin de poder hacer comparables los datos, se aplicaron distintos métodos de normalización de los mismos, dando los mismos resultados de repetibilidad, por lo que se muestran únicamente los datos de la normalización calculados a partir de la ecuación:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Donde, Xnorm es el valor normalizado, Xmin es el valor mínimo obtenido en el muestreo y Xmax es el valor máximo obtenido en el muestreo.

3. Resultados

En la Tabla 2 se pueden ver las características determinadas en el laboratorio de los materiales. En el caso de la arena de sílice, el 42% tenía entre 0,25-0,5 mm y 58%, entre 0,1-0,25 mm. La arena blanca, la sepiolita y el vidrio tenían un 100% inferior a 0,1 mm.

Tabla 2. Caracterización de los materiales y resultados generales.

	Arena amarilla	Arena blanca	Gel Sílice	Sepiolita	Arena sílice	Caucho	Crotalaria	Vidrio
Densidad (g/cm³)	1,403	1,516	0,447	0,818	1,557	0,556	0,776	1,375
Rango Granulometría (mm)	2-3	0,1-0,5	0,2-6	< 0,1	0,1-0,5	-	-	0,6-1,2
% Granulometría (mm) >4,75; 4,75-3,30; 3,30-2; <2	3-63-24-10	**	30-45-23-12	**	*	3-45-40-12	0-44-49-6	**
Dureza	>10	>10	4,5	-	>10	<1	>10	>10
Hidrófilo	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO
Abrasivo	SI	SI	NO	NO	Sí	NO	NO	NO

* 42% (0,25-0,5 mm) y 58% (0,1-0,25 mm)
** 100% < 0,1 mm

Una vez caracterizados los materiales, se comentan algunas observaciones realizadas sobre las pruebas realizadas con la máquina de aplicación en el laboratorio. Con algunos de los materiales ni siquiera se pudieron completar los ensayos de forma correcta. Así, la arena blanca, la arena de sílice y el cuscús eran tan finos que se introducían las partículas entre los elementos de dosificación y los atascaban. La arena de sílice, además, generaba una nube de polvo considerable durante los ensayos. El arroz, la crotalaria y la pasta maravilla también presentaron problemas de atascos en el borde del disco de la máquina. Esto ocurrió con mayor frecuencia cuando se realizaba el ensayo con la apertura máxima. Los materiales más duros, tales como la arena de sílice y el arroz, dificultaban mucho el accionamiento manual del disco, que acababa siendo poco uniforme. Con la cortalaria se realizaron correctamente los ensayos con apertura pequeña, pero una vez que se abría más ya se empezaba a atascar, y en la 3ª posición, con el dosificador abierto al máximo, no se pudo realizar ni un solo ensayo completo con estas semillas. El caucho era un material de granulometría muy heterogénea con partículas de mayor tamaño que la menor de las aperturas de la máquina. Por lo que, en la primera posición la distribución fue algo irregular y hubo que cribar primero el material para eliminar esas partículas de mayor tamaño. La arena amarilla funcionó bien, aunque las partículas de menor granulometrías también generaron algún atasco del disco. La sepiolita funcionó perfectamente y no generó ningún problema para ninguna de las tres posiciones del dosificador.

En aquellos materiales que sí pudieron completarse los ensayos, para las tres posiciones del dosificador, los coeficientes de variación (%CV) variaron entre el 5% y el 15% en el caso de la arena amarilla, entre el 12% y el 31% en el gel de sílice, entre el 3% y el 8% en la sepiolita y entre el 1% y el 8% en el caucho. Los ensayos a dosis más bajas son los que mayores coeficientes de variación presentaron, con la

excepción del caucho. En cualquier caso, estos coeficientes, a excepción del 31% en el gel de sílice, son aceptables para el tipo de controles que se van llevar a cabo.

En las Figuras 1-4 se representan las distribuciones de las muestras de arena amarilla, sílice, sepiolita y caucho recogidas en los ensayos para las distintas dosis analizadas. Puede verse como la sepiolita es el material que mejor comportamiento mostró, algo que concuerda con los bajos coeficientes de variación indicados anteriormente. El caucho es el que presentó una mayor variabilidad, pero también tiene un buen comportamiento, dando valores similares en las distintas repeticiones de cada dosis.

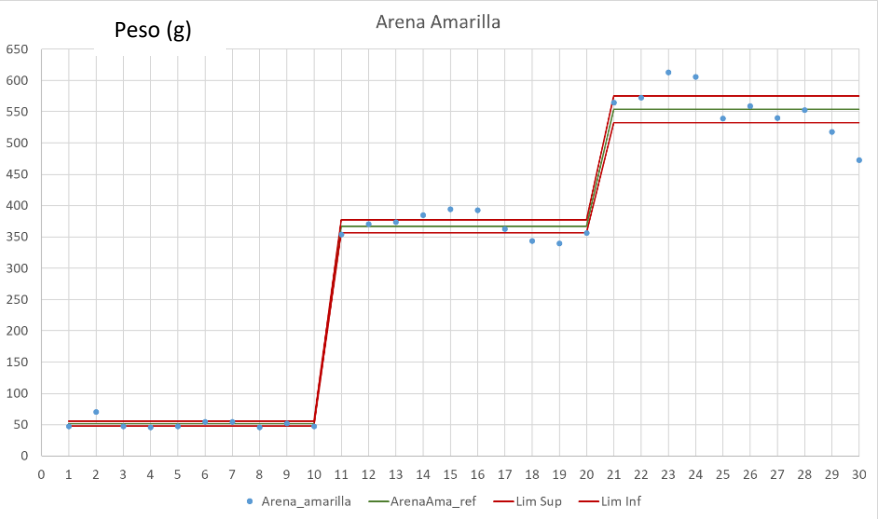


Figura 1. Peso, en gramos, de la arena amarilla para cada una de las 10 repeticiones por posiciones del dosificador. Valor de la media (línea verde) e intervalos de confianza del 90% (líneas rojas).

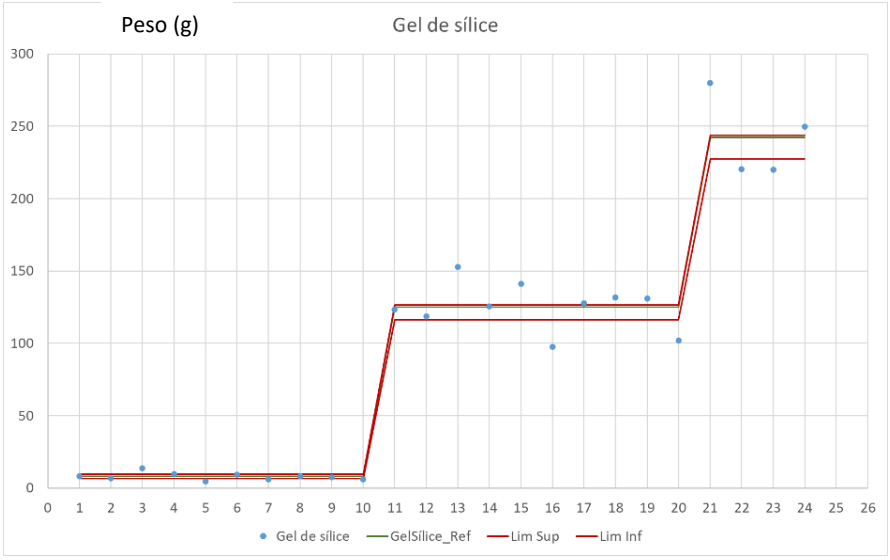


Figura 2. Peso, en gramos, del gel de sílice para cada una de las 10 repeticiones por posiciones del dosificador. Valor de la media (línea verde) e intervalos de confianza del 90% (líneas rojas).

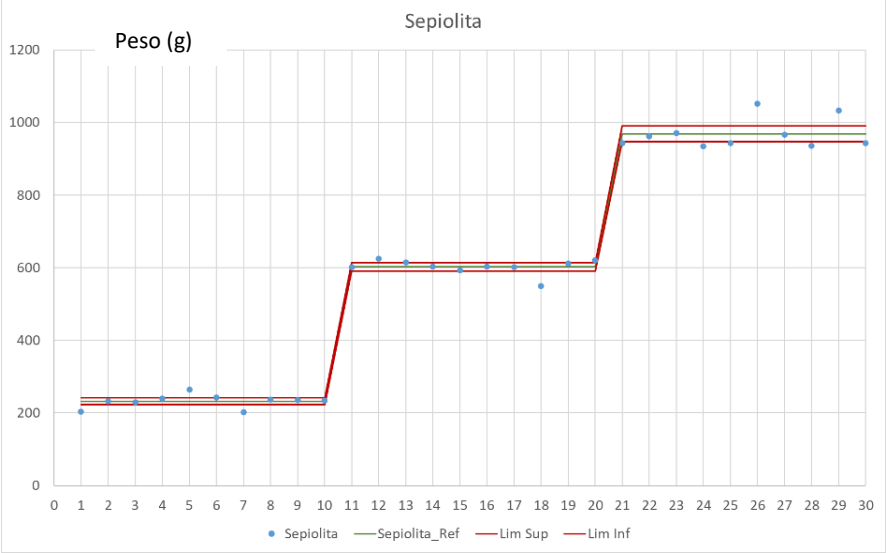


Figura 3. Peso, en gramos, de la sepiolita para cada una de las 10 repeticiones por posiciones del dosificador. Valor de la media (línea verde) e intervalos de confianza del 90% (líneas rojas).

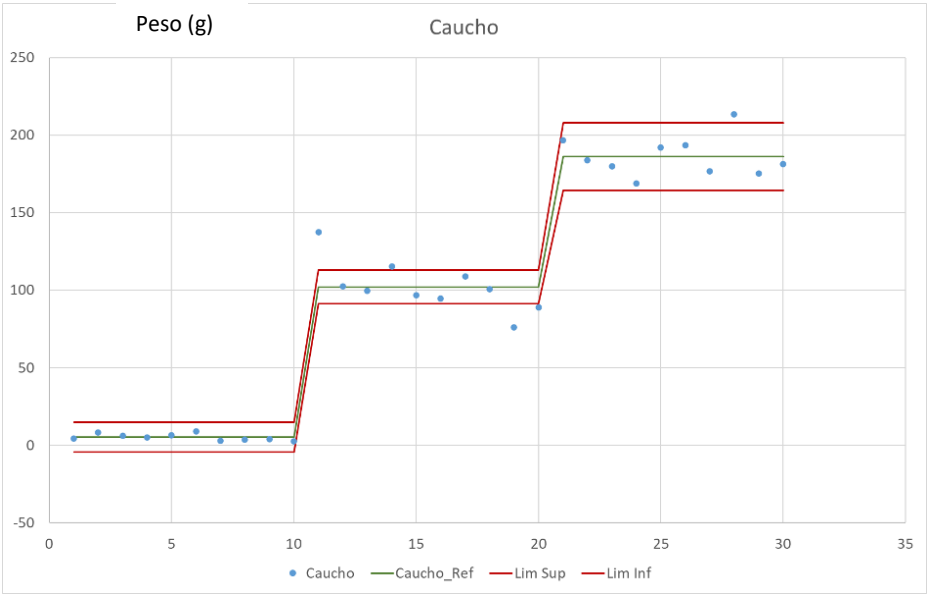


Figura 4. Peso, en gramos, del caucho para cada una de las 10 repeticiones por posiciones del dosificador. Valor de la media (línea verde) e intervalos de confianza del 90% (líneas rojas).

Los resultados de la repetibilidad de las muestras se indican en la Tabla 3. Aunque se aplicaron distintos métodos de normalización, todos dieron los mismos resultados de repetibilidad por lo que solo se muestra el indicado en el apartado 2.3. Se puede observar como todos los materiales, a excepción del gel de sílice, presentan valores de repetibilidad muy altos. En el caso de la reproducibilidad, lo que se ha buscado principalmente es ver si existen diferencias entre elegir una u otra dosis. Tal y como se ve en las Figuras (1-4), sí que hay diferencias, por lo que la reproducibilidad del ensayo estará condicionada en todos los casos por la dosis que se establezca. Esto no es un problema en los controles que realicen las ITEAF puesto que los análisis no tienen un carácter estadístico sino de control, donde la

importancia reside más que en la dosis o en el equipo, en el comportamiento del material.

Tabla 3. Ensayo de repetibilidad para diferentes materiales.

Material	Valor de repetibilidad	MeanSq factor	MeanSq Error	N	Repetibilidad	
Arena Amarilla	0,9991	3,920	0,005	0,7	muy alta	***
Arena de sílice	0,9957	2,816	0,017	0,7	muy alta	***
Caucho	0,9943	3,681	0,030	0,7	muy alta	***
Crotalaria	0,9992	1,997	0,002	0,7	muy alta	***
Gel de sílice	0,8795	0,522	0,086	0,7	alta	*
Sepiolita	0,9998	3,744	0,001	0,7	muy alta	***

4. Conclusiones

Una vez realizadas las pruebas con distintos materiales, según los resultados obtenidos en estos ensayos, se puede concluir que:

- Hay una serie de materiales no recomendados porque presentaron problemas con su granulometría, no fluyen de forma correcta, producen atascos o tienen un comportamiento irregular. Estos materiales fueron la arena (0,1-0,5 mm), el arroz, el cuscús, la pasta maravilla y la crotalaria. Además, el precio del arroz, de las pastas y, especialmente, el de la crotalaria son mucho más elevados que los demás. Con el gel de sílice también se produjeron atascos. En este caso, debido a que era un material muy heterogéneo en cuanto al tamaño de partículas. Tal vez con un material más uniforme y de una granulometría adecuada, se podría reconsiderar.
- La arena de sílice fue el material más barato de todos, pero era muy abrasivo y su manipulación generó una nube de polvo, perdiéndose más material durante los ensayos que con otros materiales.
- El vidrio filtrante ha tenido un comportamiento irregular si nos fijamos en los coeficientes de variación que presenta entre los distintos ensayos.
- El caucho, que era el material *a priori* recomendado [10], tuvo un comportamiento irregular y presentó más dificultades de distribución ya que, al ser un material heterogéneo y flexible, se quedaba adherido al disco y a las paredes de la tolva. Tiene uno de los precios más asequibles, algo más caro que la sepiolita y la arena de sílice, pero más barato que los demás y durante los ensayos no presentó pérdidas destacables.
- La denominada arena amarilla presentó buenos resultados, pero respecto a la sepiolita, es mucho más cara, presenta una granulometría mayor y es un material abrasivo. Aunque es cierto que presenta la ventaja de que es hidrófoba.
- La sepiolita fue el material que, de forma global, mejor resultado dio. Presentó una granulometría adecuada y una gran homogeneidad. Este material era el

más barato, después de la arena de sílice y no presentó problemas de atascos. Además, a su favor está el que se utiliza como material inerte para la fabricación de los fitosanitarios granulados, por lo que su comportamiento se aproximó mucho al de estos productos.

Author Contributions: Conceptualization, C.J. and P.A..; methodology, C.J., TX.M. and S.A.; software, TX.M. and S.A.; validation, C.J., TX.M and S.A-; formal analysis, TX.M. and S.A.; investigation, C.J. and TX.M.; resources, C.J., P.A. and TX.M.; data curation, TX.M, S.A..; writing—original draft preparation, C.J.; writing—review and editing, P.A., A.L., S.A.; visualization, C.J., TX.M. and A.L.; supervision, S.A., C.G.; project administration, S.A.; funding acquisition, C.J., S.A., C.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiación: Esta investigación fue financiada por MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACÍON del Gobierno de España.

Agradecimientos: Nuestro agradecimiento a Agrogardening por facilitarnos el caucho para los ensayos y a Paolo Balsari (University of Turin, Italy) por la documentación facilitada.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Directiva 2009/128/CE, de 21 de octubre, del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre el Uso Sostenible de los Plaguicidas.
2. UNE-EN ISO 16119-1: 2013. Maquinaria agrícola y forestal. Requisitos medioambientales para pulverizadores.
3. MAPA (Arazuri, S.; Arnal, P.; Jarén, C.; López-Maestresalas, A.; Mangado, T.; Gracia, F.; Solanelles, F.; Estadella, A. y Fillat, A.) Guía de inspección de equipos de aplicación de granulado. https://cpage.mpr.gob.es/ NIPO: 003-24-016-7, **2023.** https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/maquinaria-agricola/inspecciones-equipos-aplicacion-productos-fitosanitarios/
4. CropLife International. Catálogo de tipos de formulación de pesticidas y sistema de codificación. **2017**. https://croplife.org/wp-content/uploads/2017/04/Technical-Monograph-2-7th-Edition-Revised-March-2017.pdf
5. OECD. Formulación y codificación de pesticidas y biocidas. https://web-archive.oecd.org/2014-11-19/81844-oecdguidance documentsforpesticideregistration.htm (Acceso en marzo de 2025).
6. ISO 5681:2020. Equipos para la protección de cultivos – Vocabulario
7. Ley 43/2002, de 20 de noviembre, de Sanidad Vegetal. *BOE* nº 279.
8. Real Decreto 1702/2011, de 18 de noviembre, sobre inspecciones periódicas de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios.
9. ISO 8524: 1986. Equipos para la distribución de plaguicidas o herbicidas granulados - Método de ensayo.
10. SPISE Technical Working Group 9. Advice for the functional inspection of granulate application equipment, **2021**.
11. Agrogardening. https://www.agrogardening.com/jardin/540-caucho-1-4-mm-saco20-kg.html (Acceso en marzo de 2025).
12. Limpiatodo. https://limpialotodo.com/en/hardware-store/170-sepiolite-30-60-bag-20-kg-hardware-store (Acceso en marzo de 2025).
13. Harper, D.G.C. Some comments on the repeatability of measurements. *Ringing and migration*, **1994**, 15: 2, 84-90, doi: 10.1080/03078698.1994.9674078.

Efeitos da colheita manual e mecanizada na composição de vinhos merlot no sul do Brasil.

Wilson Valente da Costa Neto [1,2,3], Pilar Baeza [2] and Pilar Barrerio Elorza [3,*]

[1] Universidade Federal do Pampa, doutorando na Universidade Politécnica de Madrid, TAPAS; wilsonneto@unipampa.edu.br

[2] Universidade Politécnica de Madrid, TAPAS; pilar.baeza@upm.es

[3] Universidade Politécnica de Madrid, LPF_Tagralia;

* Correspondence: pilar.barreiro@upm.es;

Resumo: A colheita mecanizada é uma alternativa à colheita manual devido à sua alta capacidade de trabalho (1:80 colhedoras) e aos custos operacionais reduzidos. No Brasil, o número total de colhedoras de uvas é muito baixo (5), considerando a área passível de mecanização (aproximadamente 24.000 ha), e o setor enológico do país alega que as uvas provenientes da colheita mecânica apresentam maior índice de quebra de bagas e presença de MOG (material diferente da uva). Neste estudo, partimos da hipótese de que a má qualidade das uvas na colheita mecanizada está associada a deficiências na regulagem das colhedoras em termos de velocidade de trabalho, frequência de vibração, modelo da máquina (associado a princípios específicos de projeto). No entanto, há um efeito diferencial em favor da colheita mecanizada relacionado à logística de transporte e entrada na vinícola para os diferentes sistemas de colheita: manual vs. mecanizada, sendo o procedimento manual mais lento (aproximadamente 5:1). Neste estudo, a qualidade do vinho produzido em duas parcelas (0,92 e 4,46 ha) de uvas Merlot (30º47'47,1''; 55º22'59. 0'') a partir de colheita manual ou mecânica, sob diferentes condições de regulagens. Foram avaliados os s parâmetros físico-químicos com o WinescanTM (FOSS Inc.) e atributos sensoriais (como a qualidade do vinho.). O projeto experimental considera quatro modalidades de colheita: colheita manual e colheita mecânica (Pellenc 3052 e 8050), com ajustes (530 rev min-1, 480rev min-1 450 rev min-1), considerando três réplicas por modalidade obtidas por amostragem em reboques sucessivos durante a colheita mecânica, ou de 5 videiras por amostra na colheita manual. O vinho foi produzido por microvinificação (180 l no total).

Palavras chave: viticultura; cosecha mecanizada; enologia.

1. Introdução

A colheita mecanizada de uvas viníferas teve início em 1969 na Califórnia EUA, e 5 anos depois, entorno de 10% dos vinhedos daquela região já contavam com esta nova tecnologia, havendo cerca de 200 máquinas em operação [1]. Este Sistema rapidamente se expandiu para a Europa, principalmente na França, na década de 1970, impulsionada pela crise do petróleo. Desde então, a França reflete uma grande experiência de fabricação no assunto: Braud (primeiro modelo

comercializado em 1975, atualmente CNH Industrial), Gregoire (primeiro modelo em 1978) e Pellenc (no início da década de 1990) [2].

No Brasil, a primeira colhedora de uvas a entrar em operação foi em 2010 e até o ano de 2022 o país contava com apenas 5 máquinas em operação nos vinhedos conduzidos no sistema de espaldeira [3].

Uma das hipóteses pelo baixo número de colhedoras de uvas Vitis viniferas neste país seja pela menor qualidade dos vinhos obtidos pela colheita mecanizada, pois observam que há maior presença de folhas, talos e outros materiais que não a uva (MOG) e o rompimento da fruta, consequente liberação de mosto e o início de processos fermentativos com leveduras autóctones. Todavia, acredita-se que estes fatores sejam provenientes de uma regulagem inadequada das máquinas, principalmente a fatores relacionados a vibração, como sinalizam [4,5,6].

Deste modo o objetivo deste trabalho foi o de avaliar as diferenças de perdas de uvas em campo com diferentes regulagens (commercial e sugeridas) bem como características fisíco química dos vinhos provenientes de cinco sistemas de colheita: manual, mecanizada comercial (dois modelos de máquinas), mecanizado com sugestões (2) de parâmetros de regulagem.

2. Material e Métodos

2.1 Estudo de campo

O trabalho de campo foi realizado na empresa Almadén (Miolo Wine Group) na cidade de Santana do Livramento-RS em duas parcelas da variedade Merlot em sistema de espaldeira. Os tratamentos T0 a T2, parcela com 4,46ha e 3571plantas/ha (- 5% de falhas de plantio; 30°47'47.1"S 55°22'59.0"W) estudo realizado em 13/02/2022; T3 e T4 área da parcela de 0,92ha e 2778plantas/ha (- 6% falhas de plantio; 30°47'30.6"S 55°22'42.6"W) colhidos em 24/02/2022.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 5 tratamentos e três repetições identificadas conforme tabela 1.

As atividades em campo consistiram em verificar os parâmetros de regulagem das máquinas estabelecidas pelos operadores (530 rev min-1) e após sugerir outros critérios (480 e 450 rev min-1), as perdas de uvas foram avaliadas em um espaço de 18 m², centrada numa linha e a remoção das uvas presentes no solo antes da passagem da máquina conforme preconiza [5]. As perdas de uvas foram caracterizadas em perdas no solo, na planta (não remoção) e na planta próximas aos postes (pois utilizam postes de madeira com diâmetro aproximado de 12cm).

Tabela 1. Descrição dos tratamentos.

Tratamento	**Colhedora**	**Frequencia (**rev min-1**)**
T0	* colhido manualmente	-
T1	3052	530
T2	8050	530
T3	3052	480
T4	3052	450

As colhedoras analisadas eram da marca Pellenc do tipo de arrasto (rebocadas por um trator agrícola), ambas de propriedade da vinícola, sendo uma do modelo 8050, com 1120 horas de trabalho acumulado, e a outra do modelo 3052, com 2100 horas de trabalho acumulado, sendo esta a primeira colhedora de uvas importada do Brasil e que se encontrava ainda em operação.

A coleta de amostras de uvas para a microvinificação, aproximadamente 15 kg por repetição, foi realizada diretamente nos reboques utilizados para o transporte e foram conduzidas nas instalações do curso de Enologia da Universidade Federal do Pampa – BR (UNIPAMPA/DP) conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1. Colhedora prestes a realizar a descarga de uvas no reboque.

Observa-se ainda o veículo no primeiro plano da imagem acima, carregado com tanques para o transporte das amostras de uvas para UNIPAMPA/DP (80km distante).

2.1 Elaboração dos vinhos

Antes do início da vinificação, após a recepção e pesagem das uvas na UNIPAMPA/DP, elas foram armazenadas em câmara fria a 4 ºC por 12 horas. O processo de vinificação seguiu o método tradicional Figura 2, iniciando-se com o desengace, seguido de maceração pré-fermentativa com sulfitagem (75 mg.l^{-1} de anidrido sulfuroso), adição de enzima pectolítica (5 g.hl^{-1}), levedura (7,2 g em 70ml

+ 140ml + 280ml mosto em intervalos de 15 min.) e adição de Gesferm. Posteriormente, foi realizada a prensagem vertical.

A fermentação alcoólica ocorreu em ambiente com temperatura controlada a 16 ºC e foi monitorada diariamente por meio da medição da densidade do mosto.

Figura 2. Garrafões utlizados para a microvinificação (180 litros no total).

Foram realizadas análises físico-químicas do mosto no início da vinificação, antes de serem engarrafados (cerca de dois meses após a primeira trasfega, foram envasados em garrafas de 750 ml) e no dia da avaliação sensorial (13 meses após a colheita das uvas).

Logo após a conclusão da fermentação alcoólica, foi adicionado metabissulfito de potássio para ajustar o nível de dióxido de enxofre livre para aproximadamente 30 $mg.l^{-1}$.

Os vinhos permaneceram armazenados em ambiente com temperatura aproximada de 18 ºC até a realização da analise sensorial.

2.2 Avaliação Físico-química

As variáveis físico-químicas (teor de etanol (% v/v), açúcares residuais (g l-1), pH, acidez total (g l-1em ácido sulfúrico), glicerol (g l-1), ácido málico (g l-1), ácido lático (g l-1) e acidez volátil (g l-1 em ácido acético)) foram determinadas por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT - IR) no equipamento WineScan FOSS. Todas as medidas foram realizadas em triplicata e os resultados expressos em média ± desvio padrão.

2.3 Análise sensorial

Realizada em sala própria para degustação na UNIPAMPA/DP, com uma equipe composta por 11 avaliadores especializados. Foram servidos 50 ml de amostra a 12 ºC em taça padrão ISO. Foi oferecido um formulário para o preenchimento de informações descritivas (3 vocábulos descritores em ordem de intensidade 1º, 2º e 3º) e quantitativa, ficha de degustação com escala de Likert (0-9 pontos) nas

variáveis: intensidade aromática, qualidade de aroma, adstringência, acidez, volume/corpo, equilíbrio gustativo, qualidade gustativa e avaliação global.

Para o tratamento dos dados foram utilizadas planilhas eletrónicas e rotinas em ambiente Matlab para análise estatístico de ANOVA ao acaso.

3. Resultados

3.1 Estudo de campo

As perdas de uvas encontradas estão apresentadas na Tabela 2, valores que estão relacionadas a media das 3 repetições realizadas em campo em cada uma das parcelas correspondente aos tratamentos.

Tabela – 2. Perdas de uvas (kg/planta) na colheita mecanizada (v=2,3 km h^{-1}).

T1(3052 a 530 rev min-1)			**T2 (8050 a 530 rev min-1)**			**T3 (3052 a 480 rev min-1)**			**T4 (3052 a 450 rev min-1)**		
SOLO (kg)	PLANTA (kg)	POSTE (kg)	SOLO (kg)	PLANTA (kg)	POSTE (kg)	SOLO (kg)	PLANTA (kg)	POSTE (kg)	SOLO (kg)	PLANTA (kg)	POSTE (kg)
0,2012±054	0,2576±1,15	0,1468±1,07	0,022± 0, 01	0,198±0, 17	0,056±0,01	0,1775± 0,26	0,0255±0,07	0,062±0,14	0,128± 0,01	0,0575±0,13	0,026±0, 02

As perdas de uvas (solo, planta e poste) apresentaram variações significativas entre os tratamentos (T1 a T4). Em T1, observou-se maior retenção de uvas na planta (0,2576 ± 1,15 kg), seguido pelas perdas no solo (0,2012 ± 0,54 kg), enquanto as uvas não colhidas próximas ao poste apresentou menor valor (0,1468 ± 1,07 kg). Em contraste, o T2 revelou a menor perda nos três itens avaliados, com destaque para o solo (0,022 ± 0,01 kg). O T3 evidenciou maior perda de uva no solo (0,1775 ± 0,26 kg), com reduções expressivas nos demais itens, principalmente na planta (0,0255 ± 0,07 kg). Já o T4 apresentou perdas no solo (0,128 ± 0,01 kg) e o poste (0,026 ± 0,02 kg) registando valores superiores ao da planta (0,0575 ± 0,13 kg).

Quando comparado os valores de T1, T3 e T4 (modelo 3052) nota-se que a eficiência da colheita para os valores de frequência mais baixas (480 e 450 rev min-1) tendem a ser as mais adequadas para a colheita desta variedade de uva.

Analisando T2 (modelo 8050 e 530rev min-1) com os demais tratamentos, as perdas no solo foram inferiores, contudo os valores de perdas na planta e poste, ainda assim, superiores a T3 e T4. Estas diferenças podem estar relacionadas ao estado de conservação da máquina.

Utilizando os valores de produtividade registadas pela vinícola, pode-se dizer que deixaram de processar em T1 7826kg (73%), T2 3742kg (35%)de perdas de uvas (4,46ha). Por outro lado, se tivessem mantido as regulagens sugeridas de T3 e T4 as

perdas em campo teriam sido de 501kg (21%) e 440kg (19%) respetivamente na parcela de 0,92ha. Importante destacar que as parcelas possuem densidades de plantas distintas, o que contribui para as diferenças de valores, mas ainda assim, há uma tendência clara de que a empresa utiliza frequências elevadas para a colheita.

3.2 Avaliação Físico-química

Os resultados das análises físico-química desenvolvidas no equipamento WineScan FOSS estão organizadas na Tabela 3.

Tabela – 3. Resultados físico-química dos tratamentos.

Variáveis	Tratamentos					CV(%)
	T0	**T1 (3052 a 530 rev min-1)**	**T2 (8050 a 530 rev min-1)**	**T3 (3052 a 480 rev min-1)**	**T4 (3052 a 450 rev min-1)**	
Etanol (% vol.)	12,4 c	13,0 abc	12,8 bc	13,9 ab	14,2 a	3,67
Acidez total (g/L em ácido tartárico)	7,3 a	7,8 a	7,3 a	5,9 a	5,9 a	14,55
pH	3,52 b	3,53 b	3,55 b	3,71 a	3,68 a	1,25
Acidez volátil (g/L em ácido acético)	0,8 a	0,8 a	0,7 a	0,6 a	0,5 a	42,78
Índice de intensidade de cor	2,04 a	2,80 a	2,20 a	1,41 a	1,41 a	44,14
Índice de tonalidade de cor	0,68 b	0,67 b	0,70 b	0,82 a	0,82 a	6,32
Glicerol (g/L)	9,9 a	7,4 a	7,8 a	9,1 a	9,1 a	12,75
Índice de Folin-Ciocalteaux	35,1 b	35,7 b	37,4 b	48,3 a	51,8 a	12,42

* Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$).

O teor alcoólico variou entre 12,4% (T0) e 14,2% (T4), indicando maior acúmulo de açúcares assim como o pH foram significativamente mais elevados nos tratamentos T3 (3,71) e T4 (3,68), contrastando com os demais (3,52–3,55), estes valores eram esperados devido ao estado de maior maturação das uvas que acabam influenciando nas diferenças no índice de cor, que mesmo não apresentando variação significativa, (apesar de T1 ter exibido valor mais elevado (2,80)), o que resulta no menor predomínio da coloração tinta. Já o índice de tonalidade foi

significativamente maior em T3 e T4 (0,82), o que pode indicar início de evolução oxidativa ou maior proporção de pigmentos marrons. Por outro lado, estes vinhos apresentam o índice de Folin-Ciocalteaux mais elevado com T3 (48,3) e T4 (51,8), o que sinaliza uma maior concentração polifenólica.

A acidez total, expressa em ácido tartárico, não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos com valores médios entre 5,9 g/L (T3 e T4) e 7,8 g/L (T1), sugerindo estabilidade no perfil ácido, exceto por uma leve tendência à redução nos tratamentos T3 e T4.

A acidez volátil manteve-se dentro dos limites legais recomendados para vinhos, com redução gradual observada de T0 (0,8 g/L) para T4 (0,5 g/L), embora sem diferenças estatísticas, indicando fermentações estáveis e com baixa incidência de degradação microbiana.

O teor de glicerol, composto associado ao corpo e à maciez do vinho, oscilou entre 7,4 g/L e 9,9 g/L, sem diferenças significativas.

Em síntese, os tratamentos T3 e T4 se destacaram por promover maior teor alcoólico, pH elevado e acúmulo de compostos fenólicos, fatores que, em conjunto, podem influenciar positivamente na estrutura, complexidade e até no potencial de guarda dos vinhos.

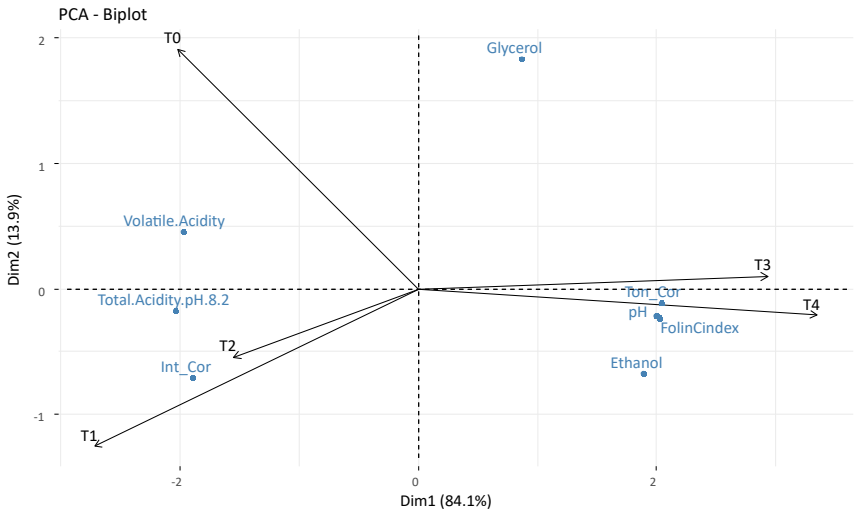


Figura 3. Gráfico dos componentes principais em duas dimensões (Dim 1 e Dim2).

A distribuição dos tratamentos em componentes principais sugere clara separação entre grupos experimentais, o que indica que os tratamentos induziram diferenças percetíveis nas características físico-químicas e sensoriais do vinho.

O tratamento T4, por exemplo, localiza-se em uma região oposta a T0, evidenciando um perfil contrastante. Essa distinção pode estar relacionada a variáveis específicas que carregam fortemente em Dim1 (84,1% explica a maior parte da variância dos dados), como teor alcoólico, índice de polifenóis totais (Folin-Ciocalteu), ou parâmetros sensoriais como cor ou intensidade aromática, sugerindo que T4 apresenta um vinho mais estruturado e intenso.

Tratamentos intermediários como T1 e T2 apresentam certa sobreposição, indicando semelhanças em suas composições e perceção sensorial, embora diferenças sutis possam ser destacadas por Dim2 (13,9%, explica uma parcela menor de variabilidade), que pode captar aspetos secundários, como nuances aromáticas ou variações no pH.

A dispersão das variáveis também reforça a multidimensionalidade das características do vinho, onde nenhuma variável isolada explica totalmente a separação dos tratamentos. Em vez disso, há uma interação entre múltiplas variáveis que contribui para o perfil final observado de cada tratamento.

3.3 Análise sensorial

Os resultados da avaliação sensorial encontram-se representados na Figura 4, permitindo a comparação entre os diferentes tratamentos quanto aos principais descritores organolépticos.

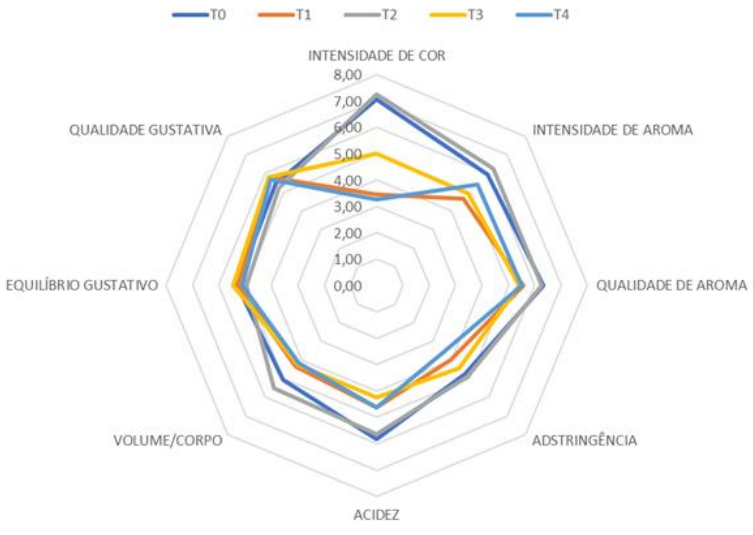


Figura 4. Características sensoriais entre os tratamentos.

Observou-se que o tratamento T2 apresentou a maior intensidade de cor, indicando maior extração ou estabilidade dos compostos fenólicos, seguido por T0 e T4. Essa

característica sugere uma coloração mais intensa e possivelmente maior atratividade visual.

Em relação à intensidade aromática, o tratamento T0 destacou-se, revelando um perfil mais expressivo no exame olfativo. Quanto à qualidade do aroma, os tratamentos T0, T3 e T4 apresentaram valores semelhantes, sugerindo equilíbrio e complexidade aromática similares entre esses vinhos.

As características gustativas, como adstringência e acidez, mostraram padrões semelhantes entre os tratamentos, com variações pouco expressivas, indicando uniformidade sensorial nesse aspeto. No entanto, os tratamentos T2 e T4 apresentaram maior perceção de volume ou corpo, sugerindo vinhos com estrutura mais robusta e persistência gustativa acentuada.

A avaliação do equilíbrio gustativo e da qualidade gustativa revelou valores próximos entre os tratamentos, evidenciando que, independentemente do perfil sensorial individual, todos os vinhos apresentaram harmonia satisfatória e bom nível de aceitação sensorial.

Os tratamentos T2 e T0 demonstraram destaque na intensidade de cor e perceção de corpo, características frequentemente associadas a vinhos de maior estrutura. Por outro lado, os tratamentos T0 e T4 apresentaram melhor desempenho na intensidade e qualidade do aroma, indicando maior complexidade no perfil olfativo.

Os descritores aromáticos estão identificados pelos degustadores estão apresentados em forma de nuvens de palavras (vocábulo), conforme Figura 5.

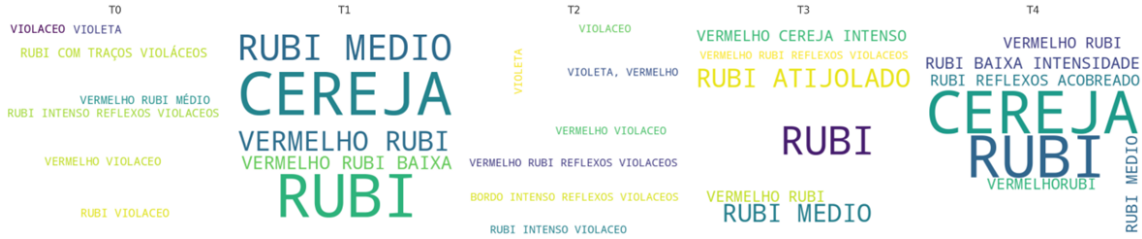


Figura 5. Descritores sinalizados entre os tratamentos.

Nos tratamentos T0, T2 e T4 foram identificados 7 descritores, enquanto T1 apresentou cinco e T3, seis. Ao comparar os tratamentos provenientes da colheita mecanizada com o manual (T0), observa-se uma maior diversidade de descritores em T2 e T4, sugerindo maior complexidade sensorial. Ressalta-se, contudo que todos os vinhos apresentam descritores compatíveis com o perfil varietal da cultivar Merlot, sem indícios de desvios sensoriais ou defeitos.

A avaliação global pontuada para os tratamentos foi T0 (85,2), T1 (85,1), T2 (85), T3 (85,2), T4 (85,6).

4. Discussão

Os valores encontrados para as perdas de uvas em campo estão associados a variedade e estado de maturação das uvas [2,4] tipo de estrutura da espaldeira e a velocidade de deslocamento da máquina, alta ou baixa amplitude do movimento das hastes e a frequencia de operação [2,4,5,6]. Os valores de velocidade observados neste trabalho estavam adequados (2,3km h -1) contudo ficou claro de que as frequencias das hastes estavam elevadas, o que demontra que quando operado na faixa de frequencias recomendada, as perdas em campo tendem a ser menores.

Os resultados fisíco quimicos estão dentro do esperado para vinhos da variedade Merlot produzidos na campanha gaúcha apresentando incluisive valores mais atrativos dos que os encontrados por [7] etanol (5 vol.) 11,45 a 13,23%, acidez total 6,5g/l, pH 3,4 a 3,5, acidez volátil 0,5 g/l, índice de intensidade de cor 1,9 a 7,1, índice de tonalidade de cor 2,4 a 7, glycerol 7,8g/l e índice de Folin-Ciocalteaux: 50. O que pode sugerir não haver diferenças entre vinhos provenientes da colheita manual e mecânica. Corroborando com as conclusões de [8] em que a colheita mecânica não compromete a composição dos vinhos Merlot da região da campanha gaúcha. Contudo encontraram diferenças quanto ao PH mais alto, menores concentrações de ácido cafeico e p-cumárico, relacionado a oxidação enzimática causada por danos mecânicos. Todavia esta pesquisa não apresenta informações de regulagem da colhedora, o que pode indicar que os resultados estejam relacionados a regulagem não adequada utilizada pela empresa.

5. Conclusão

Fatores relacionados a estrutura de sustentação das vinhas, utilização de postes em substituição a perfis mais esbeltos, como os metálicos, indicam comprometer a eficiência de recolhimento das uvas pela máquina. As frequências de vibração superiores aos valores recomendados pela literatura é apontada como uma das principais causas de perdas em campo. No entanto, quando os parâmetros de regulagem das máquinas são corretamente ajustados, as diferenças entre vinhos, vinhos oriundos da colheita manual e mecanizada, tendem a minimizar. Para finalizar, T0, T1 e T2 são tratamentos realizados em data e parcela distinta dos demais, assim, fatores como microclima, gestão do cultivo e maturação da uva, podem ter influenciado nas diferenças de grau alcoólico entre T1 e T4 por exemplo.

Contribuições dos autores: Wilson Valente da Costa Neto: Concepção, validação, análise formal, investigação, redação - preparação do rascunho original, recursos; Pilar Baeza: metodologia, pesquisa, supervisão; Pilar Barreiro: metodologia, software, análise formal, redação - preparação do rascunho original, recursos. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.**Declaração de disponibilidade de dados: Entre em contato apenas com os autores, pois envolve informações de interesse comercialConflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.**

Referencias

1. Johnson, S.S.; Mechanical harvesting of wine grapes. United States Departamento s Agriculture Economic Research Service Agricultural Economic Report, n° 385.
2. da Costa Neto, W.V., et al. 2017. First steps in the grape mechanization process in Brazil: quantitative features. CiGR Journal. august 2017, pp. 117-119.
3. da Costa Neto, W.V.; Barreio, P.E.; O início da colheita mecanizada de uvas viníferas no Brasil. In Vitivinicultura: função exata em cada processo 2. Editor 1. Del Aguila, J.S., Editor 2. Del Aguila, L.S.H. Ed. Atenas, Publicado: Ponta Grossa, Brasil, 2022; Volume 1, pp. 59-80.
4. Pezzi, F., & Caprara, C. (2009). Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations. Biosystems engineering. 281-286.
5. da Costa Neto, W. V.; Barreiro, P. E. and Garrido-Izard, M. "Impact of local conditions and machine management on grape harvest quality." Scientia Agricola 76.5 (2019): 353-361.
6. Caprara, C., & Pezzi, F. (2011). Measuring the stresses transmitted during mechanical grape harvesting. Biosystems Engineering, 110, 97-105.
7. Nicolli, K.P. Combinação de técnicas de análises sensorial e cromatográficas para caracterização da composição química de vinhos tintos da Campanha Gaúcha resultantes de diferentes manejos dos vinhedos e de tipos de solo. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2017.
8. de Andrade Kaltbach, S. B., Kaltbach, P., Santos, C. G., Cunha, W., Giacomini, M., Domingues, F., ... & Couto, J. A. (2022). Influence of manual and mechanical grape harvest on Merlot wine composition. Journal of Food Composition and Analysis, 110, 104548.

Spatial Analysis of Land Use and Occupation and Agricultural Mechanization Suitability in Alentejo (Portugal) between 2007 and 2018

Flávio Castro da Silva [1,*], Bruno Fonseca Iulianello Bruno [1], Adélia Maria de Sousa[2], António Bento Dias[2], Daiane Cecchin[1]

1 Universidade Federal Fluminense (UFF), Department of Agricultural Engineering and Environment, Niterói - Brazil. flaviocastr@id.uff.br, bruno.iulianello@id.uff.br, daianececchin@id.uff.br

2 School of Science and Technology at University of Évora, Portugal. asousa@uevora.pt, adias@uevora.pt

* Correspondence: flaviocastro@id.uff.br

Abstract: Agricultural mechanization is one of the pillars of agricultural modernization, significantly contributing to increased productive efficiency, reduced labor dependency, and improved working conditions in the field. However, the use of agricultural machinery on terrains with high slopes can compromise operational safety, with overturning being one of the main causes of accidents. Portugal ranks among the European countries with the highest number of fatal accidents involving tractors, highlighting the need for more careful territorial planning. This study aimed to analyze the evolution of land use and occupation and identify areas suitable for agricultural mechanization in the Alentejo region, between 2007 and 2018, considering slope as the main limiting factor. Geoprocessing techniques were applied in QGIS software, using data from the Land Use and Occupation Map (COS) and data obtained from Digital Elevation Models (SRTM). The selected agricultural classes included olive groves, vineyards, orchards, rice fields, pastures, protected agriculture, and temporary crops. The results revealed that 88.73% of the Alentejo area is suitable for mechanization, with a predominance of extremely suitable zones (0-5% slope), indicating technical viability for the safety of agricultural practices in the region.

Keywords: Geoprocessing; Slope and agricultural safety; Land use and occupation history

1. Introduction

Agriculture plays a fundamental role in the development of human societies, being responsible for ensuring food security and economy around the world. The mode of production has been changing as there has been overpopulation, making it necessary to produce more and more food [1]. The continuous progress of agriculture is intrinsically connected to the development of technologies that drive effective changes in production processes, raising the quality of services and products [2]. With the industrial revolution and subsequent technological steps, agriculture reached a technical and scientific stage that made it possible to increase

production without the need to expand the cultivation area, and agricultural mechanization is an important basic component in most rural development strategies, increasing productivity and labor [3].

However, the introduction of these machines brought new challenges, mainly related to work safety. If before work accidents in rural areas were basically restricted to falls, injuries with work tools (hoe, machete) and poisoning caused by venomous animals, the manipulation of pesticides and the intense use of agricultural machinery considerably expanded the risks to which rural workers are subject in their daily work [4]. Among the equipment, tractors are involved in more than half of accident cases, with the loss of longitudinal (rearing) and transverse (rollover) stability being the main causes of fatalities [5].

Thus, proper planning of agricultural activities requires soil delimitation based on its support capacity, considering factors such as slope, stoniness, effective depth, drainage capacity, and texture [3]. Slope, in particular, is a determining geomorphological factor for mechanization and safety in the field. Terrains with high slopes are associated with a higher risk of accidents with agricultural machinery, as they affect the stability and trafficability of equipment. Furthermore, slope analysis contributes to determining the agricultural suitability of the soil and to evaluating the physical-chemical conditions that influence management and conservation [6].

In this context, the use of geotechnologies has stood out as an indispensable tool for territory analysis and management. Techniques such as remote sensing and the use of Geographic Information Systems (GIS) allow the elaboration of maps through the integration of spatial data, making it possible to identify more favorable areas for the development of agriculture, livestock, and industrial activities, enabling the elaboration of safer and more efficient strategies for land occupation. In addition, these tools are presented for the historical analysis of land use, offering precise data to understand the transformations that have occurred over time.

Portugal occupies the third position in the ranking of accidents with agricultural tractors in the European Union, behind only Greece and Poland. Between 2013 and 2017, 358 deaths were recorded due to tractor accidents, with the majority caused by rollovers, where the statistical curve shows no signs of slowing down [7]. In the case of the Alentejo region, located in southern Portugal, agriculture has been a central activity, shaping land use and occupation over the centuries. This region is widely known for its extensive agricultural areas, concentrating more than half of Portugal's Utilized Agricultural Area (UAA) [8], which significantly contribute to the local and national economy.

Thus, defining suitable areas, evaluating the history of land use and occupation, as well as the potential for the use of agricultural machinery in the Alentejo region is of fundamental importance for guiding farmers, investors, and government strategic actions. This work aimed to use geoprocessing techniques to analyze land use and occupation in the Alentejo region, Portugal, from 2007 to 2018, as well as map areas suitable for mechanization based on slope as a limiting factor, in order to understand territorial dynamics and provide technical subsidies for sustainable agricultural planning, with emphasis on mitigating operational risks.

2. Materials and Methods

The study was conducted in the Alentejo region (Figure 1), located in southern Portugal, between the Tagus River and the Algarve, bordering Spain to the east and the Atlantic Ocean to the west [9]. It is the largest Portuguese region, with an area of about one-third of the total surface, covering an area of 27,436 km², and stands out for its gently undulating peneplain relief and its strategic importance for the Portuguese agricultural sector [10].

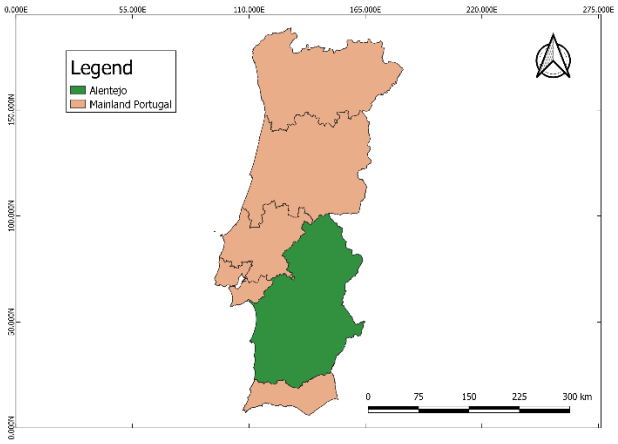


Figure 1. Location of the Alentejo region

The first step consisted of obtaining the data. The shapefile with the official administrative boundaries of Portugal, corresponding to the Official Administrative Map of Portugal - CAOP 2023, was obtained through the SNIG (National Geographic Information System) platform, which provides geographic data and services produced by public and private institutions in Portugal.

The Land Use and Occupation Maps (COS) for the years 2007, 2010, 2015, and 2018 were also obtained from SNIG, in the improved versions COS2007v3.0, COS2010v2.0, COS2015v2.0, and COS2018v2.0. For slope analysis, Digital Elevation Models (DEM) from the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) mission were

used, with spatial resolutions of 30 meters (SRTM 1) and 90 meters (SRTM 3), acquired from the OpenTopography platform.

Data processing was performed in QGIS 3.16 software. For the delimitation of the Region of Interest (ROI) based on NUTS II administrative units, using the Select Features by Area tool, generating an exclusive shapefile of the Alentejo region. Subsequently, the Clip tool was used to extract specific land use and occupation classes for Alentejo for each year. The 83 original COS classes were analyzed, with those of agricultural interest being selected: protected agriculture and nurseries, rice fields, rainfed and irrigated temporary crops, temporary crops and/or improved pastures associated with olive groves, temporary crops and/or improved pastures associated with orchards, temporary crops and/or improved pastures associated with vineyards, olive groves, spontaneous pastures, improved pastures, orchards, and vineyards. For analytical simplification, temporary crops and pastures were grouped into single categories. New shapefiles were generated for each class and year using the Select Features Using an Expression tool.

The validation of classifications was performed by visual inspection, using images from the Sentinel-2 mission, acquired from the Copernicus Data Space Ecosystem portal. Six scenes per year were processed, combining bands 4, 3, and 2 to generate color composites (true color). The image mosaic was done with the Merge tool, covering the entire Alentejo area.

For the generation of slope maps, the rasters were reprojected to the UTM zone 29N system, using the Warp tool. The slope was calculated with the Slope (GDAL) tool. Then, the rasters were clipped to the boundaries of the Alentejo region using the Clip Raster by Mask Layer tool. The thematic classification of slope was performed in two different ways using the Reclassify by Table tool, based on two criteria: (i) suitability for agricultural mechanization, according to Silva and Alves [11], with the classes: extremely suitable (0-5%), very suitable (5-10%), suitable (10-15%), moderately suitable (15-20%) and not recommended (>20%); and (ii) morphopedological characterization of the relief, according to Filho and Beek [12], with the classes: flat (0-5%), gently undulating (5-10%), moderately undulating (10-15%), undulating (15-20%), strongly undulating (20-45%) and mountainous (>45%).

The intersection of slope maps with land use and occupation classes was performed with the Clip Raster by Mask Layer plugin, generating specific raster files for each agricultural category and analyzed year. The quantification of areas, in hectares, by slope interval was obtained with the r.report tool of the GRASS plugin, allowing to measure the spatial distribution of mechanization suitability over time and by type of land use.

3. Results

3.1. Land use and occupation classes

Based on the historical analysis of land use and occupation between 2007 and 2018 (Table 1), it is possible to observe transformation trends in the different land cover classes, reflecting changes in agricultural practices and territorial management.

Table 1 - Area by land cover class.

Land cover classes	Area (ha)			
	2007	**2010**	**2015**	**2018**
Protected agriculture and nurseries	448.63	609.62	874.75	1,633.08
Rice fields	11,392.34	11,357.62	11,420.98	11,171.55
Temporary crops	482,148.85	468,368.10	464,750.01	443,370.12
Olive groves	175,734.27	192,411.69	197,836.53	213,594.90
Pastures	385,555.50	379,558.31	370,327.77	363,552.74
Orchards	4,834.75	5,568.78	6,864.10	16,659.92
Vineyards	25,523.19	25,961.79	26,866.47	29,897.35

The Protected Agriculture and Nurseries class, although representing the smallest area among those analyzed, showed the highest proportional growth in the period, going from 448 ha in 2007 to 1,633 ha in 2018, an increase of approximately 264%.

Orchards presented the second highest growth rate, with a 244% increase between 2007 and 2018. The area evolved from 4,834 ha in 2007 to 16,659 ha in 2018, with emphasis on the period 2015 to 2018, in which the area more than doubled, evidencing the appreciation of permanent fruit trees in the region.

Olive groves stood out as one of the perennial crops with the greatest expansion over the analyzed period, reflecting the growing appreciation of olive oil and olive-derived products in the agricultural market. In 2007, the area occupied by olive groves was 175,734 ha, consolidating itself as a relevant class in land use. Over the subsequent 11 years, there was a continuous increase in the area destined for this crop, reaching 213,594 ha in 2018, which represents a total growth of approximately 22%. The period from 2015 to 2018 represented a more accelerated phase, with an increase of about 7.9%, while slower growth was observed between 2010 and 2015, being approximately 2.8%.

Vineyards showed a moderate increase. At the beginning of the analyzed period, the planted area was approximately 25,523 ha and in 2018 more than 29,897 ha, representing a variation of about 17%, underlining the affirmation of viticulture as a strategic activity in the region.

On the other hand, not all classes showed growth in terms of area, which may indicate replacement by more productive and profitable systems or abandonment of areas with lower productive aptitude. The temporary crops class showed a continuous reduction in the occupied area, going from 482,148 ha in 2007 to 443,370 ha in 2018, a decrease of approximately 8%. Despite the reduction, the class was dominant among those chosen in terms of total area. Similarly, pastures, the second largest area occupant, also had a gradual reduction, going from 385,555.50 ha in 2007 to 363,552.74 ha in 2018, a reduction of 5.7%.

The rice fields class remained stable throughout the analyzed period, with discrete variations in the cultivated area. Between 2007 and 2010, there was a slight reduction of 0.3%, from 11,392 ha to 11,357 ha. In the interval from 2010 to 2015, a small increase was observed, reaching 11,420 ha, followed by a new decrease between 2015 and 2018, when the area was reduced to 11,171.55 ha, corresponding to a retraction of 2.2%.

3.2. Slope based on digital elevation models

The analysis of digital elevation models (DEM) with resolutions of 30m and 90m is represented in each scale, highlighting the capabilities and limitations of each model in capturing the relief characteristics, as shown in Table 2.

Table 2. Slope area for 30 and 90 m resolutions.

	Area (ha)	
Interval	30 m Resolution	90 m Resolution
0-5%	1,149,017	1,767,649
5-10%	932,258	670,102
10-15%	335,387	169,525
15-20%	147,462	61,341
20-45%	154,080	47,702
>45%	5,225	342
TOTAL	2,723,430	2,716,661

The comparison between digital elevation models (DEM) with resolutions of 30 m and 90 m showed relevant differences in the representation of Alentejo's relief. The 30m resolution model presented a total area of 2,723,430 hectares, with a more balanced distribution among slope classes, reflecting its greater capacity for topographic detail. In contrast, the 90m model, which represents a total area of 2,716,661 hectares, presented a considerably distinct distribution, influenced by lower spatial resolution and smoothing of topographic variations.

While the 30 m model indicated 5.66% of the total area in the strongly undulating class (20-45%) and 0.19% as mountainous (>45%), the 90 m model presented only

1.76% and 0.01%, respectively. In the moderately undulating relief classes (10-20%), the 30 m model totaled 17.7% of the area, against 8.5% in the 90 m model. The greatest difference was observed in the flat relief class (0-5%), the 90 m model estimated 65.03% of the total area in this class, while the 30 m model indicated 42.18%, a difference of more than 600 thousand hectares. This pattern confirms that the 90 m model tended to generalize the relief, reducing accuracy in identifying areas with greater topographic variation.

Therefore, and aiming for greater precision in the analysis of agricultural suitability based on slope, the use of the 30 m model was chosen for the other stages of the study.

3.3. Land use analysis with slope

The analysis of areas occupied by different land uses and covers between 2007 and 2018 reveals distinct patterns of growth, stability, and retraction, mainly influenced by terrain slope and the specific demands of each activity. The analyzed crops show significant variations in their distribution, evidencing the predominance of flat or gently sloping terrains for mechanized and intensive management agricultural practices.

The distribution of the area occupied by protected agriculture and nurseries recorded the highest relative and absolute growth in the period (Table 3). The area on terrains with 0-5% slope increased from 386.68 ha in 2007 to 1,412.13 ha in 2018, which represents an increase of more than 1,000 ha and 86% of the total area of the category. The 10-15% range had a relevant proportional increase of 425%, but with little expression in area. Regions above 15% remained stable. These results directly reflect the demand for flat terrains in this type of cultivation, essential for structuring, access, and efficient drainage in this type of cultivation.

Table 3. Protected agriculture and nurseries (30 m spatial resolution)

Interval	Area (ha)			
	Year			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	386.68	526.60	751.08	1,412.13
5-10%	58.17	78.45	114.17	206.05
10-15%	2.57	3.78	8.45	13.52
15-20%	0.40	0.97	1.45	1.37
>20%	0.08	0.08	0.08	0.08
TOTAL	447.91	609.87	875.23	1,633.14

The areas occupied by rice fields in Alentejo presented stability patterns, with small fluctuations throughout the period (Table 4). The 0-5% slope range remained

hegemonic, sustaining between 87% and 88% of the occupation over the years. Areas between 5-10% showed a slight decline, while ranges above 15% maintained minimal occupations.

Table 4. Rice fields (30 m spatial resolution)

Area (ha)				
Interval	Ano			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	9,963.24	9,933.55	10,013.69	9,789.86
5-10%	1,130.12	1,119.10	1,105.18	1,081.20
10-15%	214.02	216.27	217.08	216.76
15-20%	51.25	53.67	55.84	55.52
>20%	16.49	16.90	18.02	17.70
TOTAL	11,375.13	11,339.48	11,409.80	11,161.03

The areas occupied by temporary crops (Table 5) suffered a significant retraction in their total extension, especially on terrains with lower slopes. The 0-5% range, which concentrated most of the occupied area in all analyzed years, recorded a reduction of 8.2% in the analyzed period. The 5-10% range also decreased by 7.9%, these two ranges together concentrated 92% of the total occupation of the category in 2018, confirming that low-slope terrains are the most used for temporary crop cultivation.

Table 5. Temporary crops (30 m spatial resolution)

Area (ha)				
Interval	Ano			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	284,548.33	275,888.92	274,207.50	261,132.13
5-10%	160,102.54	155,878.55	154,453.64	147,457.13
10-15%	28,980.07	28,271.71	27,877.38	26,780.17
15-20%	5,682.13	5,532.64	5,442.61	5,254.90
>20%	1,638.61	1,594.44	1,565.24	1,534.91
TOTAL	480,951.68	467,166.27	463,546.36	442,159.24

The expansion of olive groves, one of the most striking phenomena of contemporary Alentejo agriculture, occurred mostly on flat terrains (Table 6). The 0-5% range concentrated most of the occupied area, with an increase of 27.7%. The 5-10% range also grew considerably (19.4%), contributing to a joint occupation of 85.6% in these two ranges in 2018. The ranges above 20% showed negligible growth of 0.7%, suggesting that the advance of modern olive growing systems, often based on intensive and super-intensive cultivation, prioritizes terrains compatible with high-efficiency mechanization and automated harvesting.

Table 6. Olive groves (30 m spatial resolution)

Interval	Area (ha)			
	Ano			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	85,003.52	95,536.13	98,929.62	108,597.82
5-10%	62,149.04	67,306.18	69,066.45	74,176.52
10-15%	17,687.85	18,515.97	18,769.74	19,562.09
15-20%	6,113.23	6,252.58	6,284.28	6,435.95
>20%	4,599.32	4,609.7	4,601.5	4,630.54
TOTAL	175,551	192,220.56	197,651.58	213,402.92

For the areas occupied by pastures, which showed a reduction in the total occupied area, the greatest decline observed also occurred in the lower slope ranges (Table 7). The 0-5% and 5-10% ranges, the most representative, which together accounted for 86% of the total occupied area in 2018, showed a reduction over the period of 6.8% and 5% respectively. In contrast, the higher slope ranges showed less significant reductions, the 10-15% range had a decrease of 3.8%, while the 15-20% range recorded only 3.4% reduction.

Table 7. Pastures (30 m spatial resolution)

Interval	Area (ha)			
	Ano			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	191,143.30	187,532.98	182,051.83	178,198.60
5-10%	140,702.73	138,832.72	135,987.71	133,652.08
10-15%	36,809.71	36,391.97	35,824.42	35,406.76
15-20%	10,979.27	10,883.20	10,703.54	10,604.90
>20%	5,185.78	5,186.10	5,079.90	5,040.88
TOTAL	384,820.81	378,826.98	369,647.40	362,903.22

The growth of the total area of orchards over the years was more pronounced in the lower slope ranges, below 10% (Table 8), evidencing a preference for flat or gently sloping terrains. The 0-5% range, which concentrated most of the occupied area in all analyzed years, showed an expressive increase of 269.3%, while the 5-10% range increased 260% in the period. Although growth is also observed in ranges above 10%, the absolute values remained low, reflecting the limitations imposed by steeper terrains, especially for efficient mechanization and proper management.

Table 8. Orchards (30 m spatial resolution)

Interval	Area (ha)			
	Ano			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	2,756.34	3,271.68	4,145.86	10,180.72
5-10%	1,421.86	1,609.57	1,937.92	5,119.97
10-15%	358.68	398.91	469.47	943.62
15-20%	143.38	146.03	160.35	237.19
>20%	150.05	137.91	142.49	164.38
TOTAL	4,830.32	5,564.10	6,856.10	16,645.88

Between 2007 and 2018, the area occupied by vineyards showed moderate growth, with expansion concentrated on low-slope terrains. The 0-5% range had the largest absolute increase, from 15,546 ha to 17,919 ha, consolidating itself as the most representative, despite the lower proportional growth (15.3%). The 15-20% range recorded the highest proportional growth (25.9%), but with an absolute increase of only 66 ha. The other ranges showed proportional increases close to 20%, indicating relatively uniform expansion on moderately sloping terrains.

Table 9. Vineyards (30 m spatial resolution)

Interval	Area (ha)			
	Ano			
	2007	2010	2015	2018
0-5%	15,546.33	15,768.24	16,235.06	17,919.05
5-10%	8,181.57	8,369.68	8,726.20	9,801.12
10-15%	1,389.20	1,418.16	1,481.56	1,701.86
15-20%	253.52	261.97	277.18	319.34
>20%	66.22	72.49	74.02	79.90
TOTAL	25,436.84	25,890.54	26,794.01	29,821.26

In general, the integrated analysis between land use and slope shows that agricultural occupation in Alentejo has occurred in a manner compatible with topographic conditions, prioritizing mechanizable areas and respecting natural relief limitations.

3.4. Degree of mechanization suitability

The suitability of lands for mechanized agriculture is intrinsically linked to their geomorphological characteristics. Areas with slopes below the operational limit are considered suitable for the use of tractors and agricultural machinery. On the other hand, terrains whose slope exceeds the operational limit are classified as unsuitable for mechanization [13].

In the context of Alentejo, the level of terrain suitability for mechanization was analyzed based on the following slope classes: extremely suitable (0-5%), very suitable (5-10%), suitable (10-15%), moderately suitable (15-20%) and not recommended (>20%) (Table 10 and Figure 15). This classification reflects the region's conditions and technical suitability for mechanized agricultural practices, considering not only the feasibility of machine use but also operator safety.

Table 10. Slope classes in relation to mechanization in Alentejo (30 m spatial resolution)

Interval	Area (ha)
0-5%	1,149,017
5-10%	932,258
10-15%	335,387
15-20%	147,462
>20%	159,305
TOTAL	2,723,430

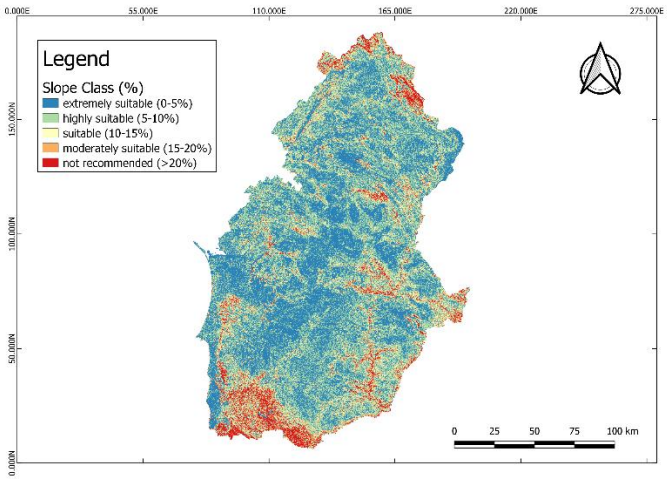


Figure 2. Slope Classes in relation to mechanization

The slope classes in relation to mechanization in Alentejo presented the following percentages: 42.19% are areas considered extremely suitable; 34.23% classified as Very Suitable; 12.31% as suitable; 5.41% as moderately suitable and 5.85% not recommended.

Among the main land uses, rice fields and protected agriculture areas concentrate the highest percentages of extremely suitable areas, with 87.67% and 86.24%, respectively. Vineyards, orchards, and temporary crops also show good suitability, with about 59% to 61% of their areas on highly mechanizable terrains. Olive groves and pastures have slightly lower values, close to 49%, but still demonstrate strong affinity with areas favorable to mechanization.

The other suitability classes appear residually. In general, less than 3% of the analyzed areas for each use are in not recommended terrains, reinforcing that agricultural occupation in the region follows a logic compatible with topographic suitability and technical requirements of mechanization.

4. Discussion

The results obtained show that land use and occupation in Alentejo have undergone significant transformations over the last decades, reflecting changes in the regional productive model. Portugal's integration into the European Union in 1986 and the implementation of the Common Agricultural Policy (CAP) guidelines led to a restructuring of agricultural production systems [14]. The data from this and other studies illustrate these dynamics. Between 2007 and 2018, there was significant growth in areas destined for protected agriculture and nurseries (+264.49%) and orchards (+244.01%), as well as a more moderate expansion of olive groves (+22.14%). In contrast, there was a retraction in areas of temporary crops and pastures.

Marques and Carvalho [8], analyzing the evolution of agricultural systems in Alentejo between 1989 and 2009, identified trends similar to those observed at the national level, such as the decrease in temporary crops and the increase in pasture areas. This latter growth was motivated, according to the authors, by the need to feed an expanding cattle population. They also found an increase of approximately 50 thousand hectares in permanent crops, driven by increases of 10 thousand hectares in vineyards, 15 thousand in olive groves, and 25 thousand in nut crops, especially in the interval from 1999 to 2009. Costa e Silva [15], based on data from the National Statistics Institute (INE), analyzed the transformations in Alentejo agriculture between 1998 and 2015. The data indicates that the rice area had modest variations (+8%), although between 2005 and 2008 it registered an increase of 10%, followed by a reduction of 1,123 hectares between 2011 and 2014. Olive groves grew from 158,643 ha in 1999 to 180,196 ha in 2014. Vineyards, in turn, showed fluctuations: from 31,134 ha in 1999, they increased to 33,444 ha in 2005, then receded to 31,929 ha.

The information from the literature corroborates and complements the results obtained, despite variations in absolute values due to different databases. Continuous growth was observed in olive groves, vineyards, and orchards, reduction in temporary crops, and stability in rice field areas. The only inversion was in pastures, which grew until 2009 and receded in the following years. This pattern indicates a reorganization of land use, with greater emphasis on permanent crops.

From the perspective of operational safety, the Alentejo region presents a highly favorable territorial configuration for the development of mechanized agriculture, both from the perspective of operational safety and technical viability. The predominance of areas with slopes below 15%, therefore technically suitable for mechanization, positions the territory as strategic for the adoption of modern mechanization systems, with reduced risks of erosion, machine accidents, and operational limitations. This data reinforces the observations of Faísca [16], who describes the region as characterized by gently undulating relief, with few elevations above 600 meters, in addition to corroborating estimates from the Regional Forest Management Plan of Baixo Alentejo, according to which 83% of the sub-region is extremely suitable for agriculture, with only 2% having severe topographic restrictions.

Rice crops and protected agriculture concentrate more than 85% of their areas on terrains with slopes between 0% and 5%, classified as extremely suitable for mechanization and water management. This distribution reflects the topographic requirements of these crops. For rice fields, slopes below 1% are ideal for surface irrigation and up to 5% for furrow irrigation. In protected agriculture, slopes between 1% and 3% prevent water accumulation and favor operational efficiency of greenhouses [17]. Temporary crops, orchards, and vineyards also show strong association with areas up to 10% slope, with more than 90% of their surfaces in mechanizable zones. Despite the greater tolerance of vines to sloping terrain, Silveira and Leão [18] warn that slopes above 20% increase soil conservation costs, hinder mechanization, and increase operational risks. Olive groves and pastures showed greater altimetric dispersion, with about 5% to 6% of their areas located on terrains moderately suitable or not recommended for mechanization. These zones, although minority, require specific care regarding the choice of implements and operational stability [13]. In the case of pastures, Araújo [19] emphasizes that slopes above 30% should be avoided due to the risk of erosion, animal wear, and management difficulties.

When comparing the topographic suitability of Alentejo with other Portuguese regions, such as the municipality of Mirandela, a significant contrast is observed. Hasse [20] reports that more than 50% of Mirandela's territory has slopes above 12%-15%, and about 25% of the area has slopes above 25%–30%, resulting in only 1% of the territory with high agricultural aptitude. This contrast highlights the geomorphological advantages of Alentejo for the development of modern, efficient, and mechanizable agriculture.

5. Conclusions

It is concluded that a large part of Alentejo has flat or gently undulating terrain, representing 76.42% of the total area, where most of the areas occupied by the selected crops are characterized as flat relief. This predominance of low-slope terrain is a determining factor for mechanization suitability, where Alentejo has 88.73% of the total area considered suitable for mechanization. Considering that all selected crops are in regions that present at least more than 49% of conditions extremely suitable for mechanization.

References

1. Silva, L.G.; Soares , U.G.; Melo , S.G.F. Evolução da mecanização agrícola: a trajetória da mecanização das colheitadeiras e tratores um estudo com o olhar sobre as máquinas da CASE IH®. Scientia Generalis, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 419–428, 2023. DOI: 10.22289/sg.V4N2A36.
2. SAHOO, S.; LO, C. Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review. Journal of Manufacturing Systems, v. 64, p. 236-250, 2022.
3. Francisco, P.R.M.. Classificação e mapeamento das terras para mecanização agrícola do estado da paraíba utilizando sistema de informações geográficas. Diss. Dissertação (Mestrado em manejo de Solo e Água) Universidade Federal da Paraíba Areia, PB–2010, 2010.
4. Schlosser, J.F.; Debiasi, H.; Parcianello, G.; Rambo, L. Caracterização dos acidentes com tratores agrícolas. Ciência Rural, v. 32, p. 977-981, 2002.
5. Trindade, A.; Albuquerque, D.; Marques, F.; Silva, H.; Contente, O. Estabilidade estática e dinâmica de um trator agrícola. 9º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / VI Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo, 2017.
6. Segato, P.H. Potencial de mecanização da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba, Minas Gerais. 2023
7. Confagri. Portugal é um dos três países europeus onde morrem mais pessoas em acidentes com tratores. O que é que se passa?, 2019.
8. Marques, C.; Carvalho, M. A agricultura e os sistemas de produção da região Alentejo de Portugal: evolução, situação atual e perspectivas. Revista de Economia e Agronegócio, [S. l.], v. 15, n. 3, 2017. DOI: 10.25070/rea.v15i3.500
9. Pereira, M.M.D. A degradação ambiental no Alentejo – Portugal. Causas e consequências. Anais do IV Simpósio Cearense de Microbiologia (livro eletrônico): microrganismos pandémicos, 1ª ed., Sobral, CE, 2021.
10. De Matos Bartolomeu, M.F. Avaliação e controlo de riscos profissionais nas operações com tratores agrícolas numa exploração agropecuária do Baixo Alentejo. 2022. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico de Beja (Portugal).
11. Silva, F. M.; Alves, M. C. Cafeicultura de Precisão. 1°ed.- Editora UFLA, 227p., 2013.
12. Ramalho-Filho, A. & Beek, K.J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1994. 65 p.
13. Lacerda, H. C.;Fonseca, H. P.;Faria, A. L. L. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio xopotó: utilizando imagens palsar e sentinel–2. III Simpósio De Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul. 2018
14. Belo, C.C; Coelho, I.; Rolo, J.; Reis, P. Sistemas agroflorestais em Portugal continental. Parte II: montados, condições de uso do solo e evolução. Revista de Ciências Agrárias, v. 37, n. 2, p. 122-130, 2014.
15. COSTA, A.P.C.Q.; SILVA, F.G. Evolução da PAC e da agricultura portuguesa no período 1998-2015: o caso das principais culturas da região do Alentejo. 2017.
16. Faísca, C.M. A produção agrícola no Alentejo (1929-2018): uma primeira abordagem. Revista de Estudios Económicos y Empresariales, Núm. 31, 2019, pp. 39-64, 2019.
17. GOES, A. C. P. Viveiro de mudas-construção, custos e legalização. 2003.
18. da Silveira, S.V.; Leão, P.C.S. Implantação do vinhedo. Embrapa - produção integrada de uva para processamento, v. 3, 2011.
19. Araújo, J.A. Estratégias adotadas na produção de bovinos de corte à pasto na entressafra, 2020.

20. Hasse, D. Impactos da colheita mecânica de azeitona nas propriedades físicas do solo, NE Portugal. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2023

Historical Dynamics of Soil Carbon Stocks Using Remote Sensing and Modeling in Rio de Janeiro, Brazil

Flávio da Silva[1,*], Anna Amandi Baker[2], André Belém[3], Gabriel da Silva[4], Daiane Cecchin[5]

Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói-RJ, Brazil; flaviocastro@id.uff.br; amandianna@id.uff.br; andrebelem@id.uff.br; gbrazo@id.uff.br; daianececchin@id.uff.br

* Correspondence: flaviocastro@id.uff.br

Abstract: Soil organic carbon (SOC) storage is influenced by climatic variables and land use and land cover (LULC). Changes in land use, wildfires, and deforestation reduce this storage, whereas preserved vegetated areas act as carbon sinks. This study analyzed annual SOC anomalies in the Intermediate Geographic Region of Rio de Janeiro (1985-2021) and land use dynamics up to 2023. Transitions between classes, expansion, or contraction of cover types, and carbon losses and gains were assessed. Using data from MapBiomas and TerraClimate, along with Principal Component Analysis (PCA), influential variables were identified. The results show that 24% of the area underwent significant changes, with forests contributing positively, whereas non-vegetated areas and temporary crops exhibited the highest negative correlation. During the study period, a loss of 4,631,328.39 tons of soil carbon was observed, representing 9.26% of the initial stock. Climatic factors such as precipitation and evaporation also affected carbon retention. The study highlights sustainable management practices and soil conservation methods to mitigate emissions, restore carbon stocks, and contribute to climate strategies.

Keywords: Land Use and Land Cover; MapBiomas; Principal Component Analysis

1. Introduction

Climate change, driven by increasing greenhouse gas emissions, has significantly altered terrestrial systems. Fossil fuel combustion, deforestation, and intensive agriculture are the primary contributors to this phenomenon. In this context, the soil's capacity to store carbon has become a crucial factor in mitigating these changes [1]. Land use and land cover over time directly influence this capacity, as inadequate practices can lead to rapid carbon loss, whereas forested or densely vegetated areas generally exhibit higher carbon stocks compared to urbanized or agricultural regions [2].

The Intermediate Geographic Region of Rio de Janeiro, which includes the state capital and [25] other municipalities, has undergone intense development and urbanization in recent decades. However, in recent years, its migratory attraction capacity has declined, while intensive land exploitation has increased, resulting in a complex land use scenario [3]. Additionally, the region's proximity to the ocean makes it susceptible to significant climatic variations, with anomalies impacting agricultural productivity and the state's economy.

The region is entirely located within the state of Rio de Janeiro, situated along the Atlantic Ocean in southeastern Brazil, and classified under Köppen-Geiger as Af, Cfa, Am, and Aw. The state encompasses the Atlantic Forest biome, known for its remarkable biodiversity but also subject to constant deforestation threats. Along the coastal strip of the city of Rio de Janeiro, a semi-arid climate has been identified, raising concerns about climate change [4] and indicating potential alterations in local hydrological dynamics, which may directly impact soil carbon storage.

Given this context, this study analyzes changes in soil organic carbon (SOC) storage associated with LULC changes and climatic anomalies between 1985 and 2021. To achieve this, Google Earth Engine and Python were utilized, enabling the integration and analysis of large datasets, facilitating the identification of factors influencing carbon storage. These tools allow for historical analyses, supporting sustainable planning strategies and environmental conservation.

According to the terrain classification proposed by Embrapa, the study area exhibits visibly low slopes in part of its extent. This factor contributes to the territorial expansion of livestock farming, which can later be converted into agricultural areas and urban centers [5,6]. The state has also undergone significant LULC changes, with permanent and temporary crops and planted pastures experiencing area reductions. Meanwhile, natural pastures, natural forests, and planted forests showed an increase between 2006 and 2017 [7-9].

Another factor influencing land use and cover was the expansion of urban areas in the state, with a growth rate that has been declining [10]. However, this shift towards urban land use is a key factor in the reduction of soil carbon stocks, enzymatic activities, and soil macrobiota action [11].

Soil carbon storage plays a crucial role in climate change mitigation and the provision of ecosystem services. The intense urbanization of the state of Rio de Janeiro underscores the need to understand how land use changes affect this storage. The use of advanced computational techniques enables analyses using secondary data, reducing costs and enhancing the scalability of applications.

2. Materials and Methods

In the construction of this study, various tools were employed to manipulate an extensive database, focusing on land use and land cover analysis and soil organic carbon stock.

Google Earth Engine (GEE) was used to obtain annual data on land use and cover, total carbon stock, hectares occupied by each class, carbon stock per class, and areas occupied by each land use transition. Data processing and the creation of Principal Component Analysis (PCA) were performed using Python in the Google Collaboratory environment. Thus, each pixel was analyzed and recorded in a dataframe, registering the parameter value corresponding to each geographic coordinate.

Principal component analysis was conducted in the Collaboratory environment, where Kendall's correlation was also performed, along with the calculation of total variance and the variance explained by each principal component. Additionally, graphs were generated to interpret PCA correlations, including a heatmap illustrating the influence of each parameter on the three main PCA components. QGIS (version 3.23.3) was used to delimit the study area and reclassify land use and land cover maps.

Land use and cover maps were obtained through the MapBiomas Brazil platform in GEE, which is widely used in land use studies [12]. The MapBiomas classification covers 37 land use and cover classes, with data at a spatial resolution of 30 x 30 m, derived from Landsat satellite images, covering the period from 1985 to 2023. For this study, a resolution of 100 x 100 m was adopted.

To optimize the analysis, the original 37 classes were regrouped into 12 classes, aiming to reduce data complexity and facilitate interpretation. The reclassification followed the codes from MapBiomas Collection 9, distributed into the following categories: Forest, Non-Forest Natural Formation, Agro-pastoral, Pasture, Agriculture, Temporary Crop, Permanent Crop, Silviculture, Mosaic of Uses, Non-Vegetated Area, Water Body, and Not Observed.

PCA was conducted by quantifying each class pixel by pixel and counting the number of pixels in each new class, representing the occupied hectares. Annual dataframes were combined into a single table, enabling the analysis of class evolution throughout the historical series.

Soil carbon stock data comes from the MapBiomas Beta Collection, which provides annual information for the surface layer from 1985 to 2021. This dataset was used

to analyze variations in carbon stock by land use class, allowing a comparison between occupied hectares and carbon per hectare. Data for the study area were correlated with information from the state of Rio de Janeiro to assess regional patterns of carbon stock variation.

Climate variables were obtained from TerraClimate, a dataset that provides detailed monthly global hydrological and climate balance data [13]. The data used include precipitation, maximum and minimum temperature, vapor pressure, snow water equivalent, solar radiation, wind speed, potential and actual evapotranspiration, water deficit, and runoff. Monthly average values and anomalies for the 1985-2021 series were considered, compared to the 1981-2010 climatological normal, as recommended by the World Meteorological Organization (WMO) and adopted by the National Institute of Meteorology (INMET) [14].

To understand the dynamics of land use changes and carbon stock, three main analyses were performed: the study of Temporal Variation in Land Use Classes: Analysis of class evolution in 1985, 1995, 2005, 2015, and 2023, with transition matrices between 1985 and 2023 [15]; the study of Carbon Stock Variation by Land Use Class: Identification of spatial and temporal patterns in soil carbon stock, comparing study region data with the state of Rio de Janeiro [16]; Principal Component Analysis (PCA): Use of PCA to reduce data dimensionality and identify the most relevant variables in carbon stock variation, based on the methods of [17,18].

Kendall's correlations were calculated to identify significant relationships between variables, using Kendall's tau as the statistical association measure [19]. Results were visualized through graphs and heatmaps, facilitating the interpretation of analyses.

3. Results

- *Temporal Variation in Land Use Classes*

The results indicated significant transformations in vegetation cover, with the expansion of urban areas, forests, silviculture, temporary crops, and water bodies, alongside the reduction of non-forest natural formations, pastures, and mosaics of uses. These changes were associated with variations in carbon stock, particularly in forest areas, non-forest natural formations, pastures, mosaics of uses, temporary agriculture, non-vegetated areas, and water bodies.

The study region underwent significant transformations in land use and cover. By analyzing the change in area occupied by each class, it is possible to determine the

growth rate over time. Forest areas showed a total increase of 168.15 km², despite an initial decline in the historical series. Temporary crop, silviculture, non-vegetated areas, and water bodies also recorded growth of 4.66 km², 0.79 km², 847.35 km², and 3.46 km², respectively, though with variations over the analyzed period. On the other hand, pasture areas experienced a significant reduction in the last period, totaling 163.26 km². Mosaic of uses areas initially declined but resumed growth in the most recent period, with a total expansion of 520.46 km², while non-forest natural formations continuously decreased by 46.1 km².

Table 1 indicates the growth rates between the years 1985-1995, 1995-2005, 2005-2015, and 2015-2023, as well as the overall growth rate for the entire study period.

Table 1 – Growth Rate for the Studied Classes

Class	Growth Rate (%)				
	1985 - 1995	**1995 - 2005**	**2005 - 2015**	**2015 - 2023**	**1985 - 2023**
1	-1.77	2.11	0.87	2.49	3.70
2	-15.50	-0.05	-14.71	-9.58	-34.86
4	3.64	1.08	9.27	-21.40	-10.03
6	-145.62	6.39	284.25	17.27	1077.45
8	0.00	3421.97	34.16	237.90	1865.65
9	-5.03	-10.70	-15.95	12.43	-19.85
10	16.79	14.68	12.29	3.15	55.13
11	2.30	-8.92	2.67	6.35	1.74

The transition matrix between land use and land cover classes, illustrated in Table 2, exemplifies the transitions that occurred and quantifies each area that changed classification between 1985 and 2023.

Table 2 – Transition Matrix between Land Use Classes (1985 to 2023)

Class		**Land use and land cover in 2023 (km²)**							
		1	**2**	**4**	**6**	**8**	**9**	**10**	**11**
Land use and land cover in 1985 (km²)	**1**	**4205.44**	0.10	94.93	0.06	0.69	219.45	26.06	2.69
	2	5.16	**70.92**	4.14	0.02	0.00	31.10	14.08	6.80
	4	82.88	0.99	**921.31**	1.70	0.05	478.87	134.41	7.50
	6	0.14	0.00	0.17	**0.01**	0.00	0.11	0.00	0.01
	8	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00
	9	390.33	11.25	456.06	2.66	0.02	**1353.97**	384.81	22.77
	10	1.57	0.71	5.99	0.02	0.00	16.02	**974.96**	2.15
	11	18.66	3.72	0.14	0.00	0.00	6.43	4.20	**165.60**

- *Carbon Stock Variation by Land Use Class*

The study region experienced significant transformations in land use and land cover, altering the soil carbon stock. Table 3 illustrates how the total carbon stored in each land use class varied over the historical series, quantified for the years 1985, 1995, 2005, 2015, and 2021.

Table 3 – Carbon Stored in Each Class Every Ten Years

	Carbon stock in soil in Megatonnes (Mt)				
Class	**1985**	**1995**	**2005**	**2015**	**2021**
1	24.71	23.30	24.50	24.89	24.89
2	2.20	1.46	1.68	1.37	1.43
4	11.21	11.55	11.14	11.06	9.24
6	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	10.34	10.11	8.78	7.82	8.98
10	1.02	0.27	0.22	0.29	0.29
11	0.53	0.50	0.31	0.28	0.28
Total:	50.01	47.20	46.63	45.72	45.38

The carbon stock stored in the soil varied significantly in the study area throughout the historical series. Forests (class 1) contributed 430,959.58 tons, temporary agriculture (class 6) contributed 23,515.84 tons, and forestry (class 8) contributed 1,387.89 tons of carbon.

Other classes contributed negatively to the carbon stock, indicating carbon loss: non-forest natural formation (class 2) lost 770,785.75 tons, pasture (class 4) lost 1,963,549.18 tons, land use mosaics (class 9) lost 1,364,026.26 tons, non-vegetated areas (class 10) lost 736,216.60 tons, and water bodies (class 11) lost 252,613.91 tons.

The total carbon loss exceeded positive contributions, resulting in a deficit of 4,631,328.39 tons, representing 9.26% of the initial stock between 1985 and 2021 in the study area.

Considering the values presented in Table 3, which provides data for the state of Rio de Janeiro on initial and final carbon stock in tons and the percentage growth of each class, the data show that the state's loss was 2,153,334.68 tons. Thus, the study area had a greater deficit than the state.

Table 4 – Data for the State of Rio de Janeiro Soil Carbon Stock in Megatons (Mt)

	Carbon stock in soil in Megatonnes (Mt)		Growth Rate (%)
Class	**1985**	**2021**	**1985-2021**
1	67.57	71.46	5.70
2	13.27	12.78	-3.68
4	88.69	84.78	-4.42
6	4.25	6.68	57.02
8	0.00	0.00	1,411.01
9	35.46	35.26	-8.19
10	1.60	0.98	-38.63
11	2.37	1.83	-22.59
Total:	213.21	211.06	-1.01

The analysis of both tables highlights that the forest, temporary agriculture, and forestry classes acted as carbon sinks in both cases. On the other hand, the classes of non-forest natural formation, pasture, land use mosaics, non-vegetated areas, and water bodies lost carbon in the soil, either through transitions to another class or through atmospheric loss.

The table exemplifies that the total accumulated soil carbon stock among the classes had a negative growth rate for all analyzed periods, with a final rate of -9.26%, significantly higher than the state's negative growth rate of -1.01%. The analysis of the percentage variation in soil carbon accumulation rates for each class between 1985 and 2023 reveals distinct dynamics among different land uses.

The Temporary Agriculture and Forestry classes exhibited the highest growth percentages, with extremely high rates of 14,743.85% and 6,001.99%, respectively. These values reflect the significant increase in land management for agricultural and forestry practices, although the total area still represents a small fraction of the territory, and the absolute carbon stock remains low.

The Forest class also showed slight growth (1.74%), indicating some stability in the carbon stock. Conversely, the Non-Forest Natural Formation, Pasture, Land Use Mosaics, Non-Vegetated Areas, and Water Bodies classes recorded negative rates of -35.00%, -17.52%, -13.19%, -71.96%, and -47.80%, respectively. These data suggest that part of the carbon from these classes may have been transferred to other classes due to land use changes, such as conversion to agriculture or urban areas.

- *Principal Component Analysis (PCA)*

The principal component analysis (PCA) showed that classes such as Forest and Non-Forest Natural Formation increase soil organic carbon (SOC), while Temporary Agriculture and Non-Vegetated Areas reduce SOC. Additionally, climatic variables such as precipitation and evaporation indirectly influence SOC, with higher precipitation and lower evaporation favoring carbon retention.

The PCA initially included 11 climate anomaly variables, 12 land use classes, and the carbon stock anomaly variable. During the exploratory phase, the first analysis identified the optimal number of components to represent the dataset's total variance.

To refine the analysis and better understand the variance distribution of climatic parameters and land use classes, a second group of variables was created, based on Kendall correlations from the first step and eigenvector sizes and associations. In the second PCA, the carbon stock anomaly variable was retained, along with the land use classes: Forest, Non-Forest Natural Formation, Temporary Agriculture, Perennial Agriculture, Forestry, Land Use Mosaics, Non-Vegetated Areas, and Water Bodies. Climatic variables were orthogonal to the carbon stock, indicating low correlation, and only those with the most significant eigenvectors were retained: precipitation, evaporation, and radiation

In the new PCA obtained with this variable group, a third step removed radiation variables, which had highly correlated eigenvectors with evaporation. The Perennial Agriculture and Forestry classes were excluded due to their small area in the study region, as well as the Water Bodies variable, as it does not undergo direct land use conversions. The third PCA step was conducted with three principal components.

The PCA identified three principal components that capture data variability. PC1 explains 66.80% of the variance, encompassing most of the dataset's information. PC2 accounts for 19.26%, providing significant complementary insights, while PC3 contributes 6.28%, adding a smaller but relevant share. Collectively, these components represent 92.35% of the total variance. [20,21]. Figure 1 presents a heat map showing the intensity of the correlation between the variables and the principal components.

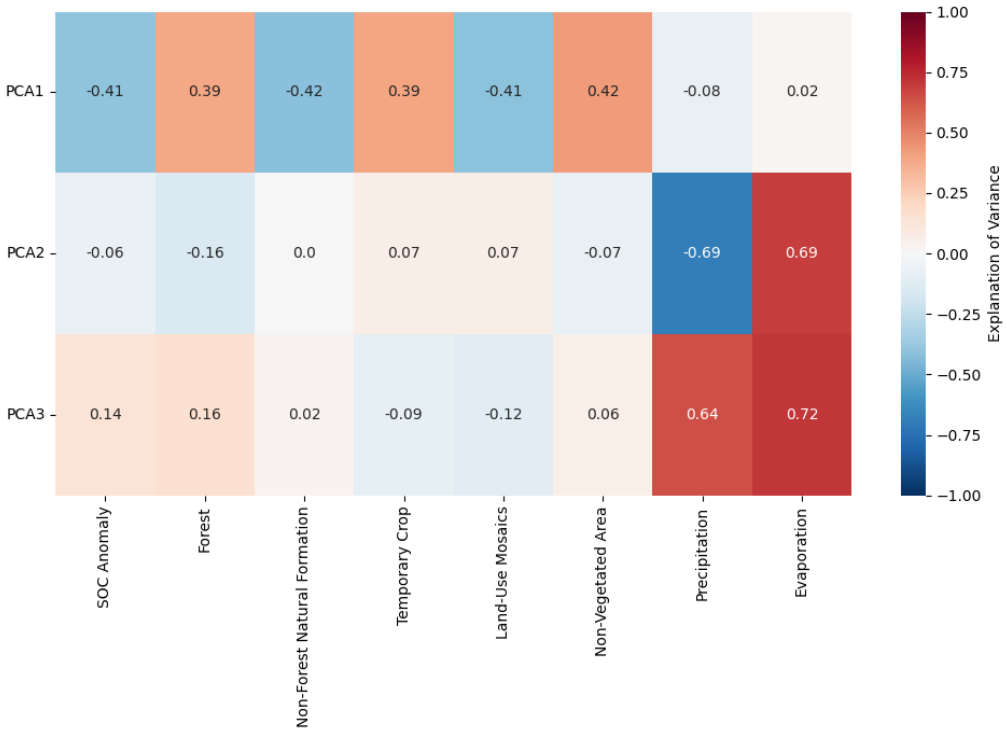


Figure 1 – Heatmap of the correlation between variables and principal components

Figures 2, 3, and 4 illustrate the vector distribution after the third stage of the PCA, maintaining the selected variables and distributing them among the three principal components.

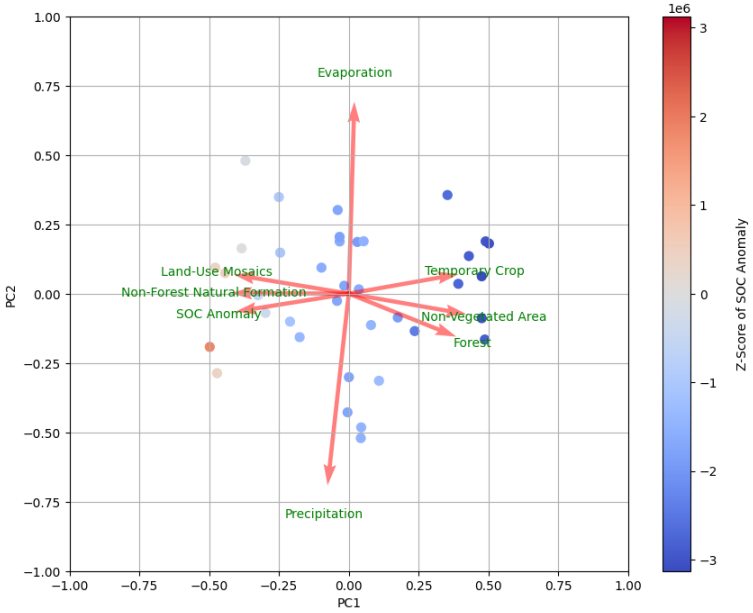


Figure 2 – PCA (Biplot) graph for components PC1 and PC2

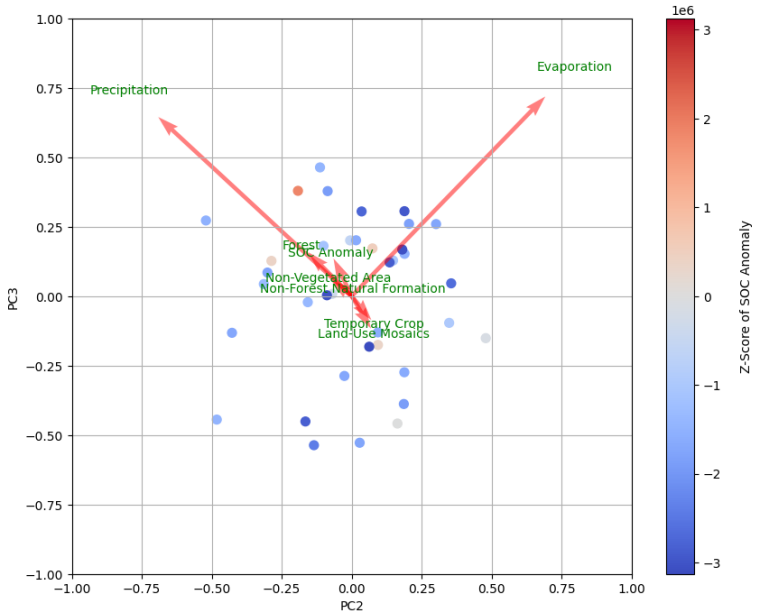


Figure 3 – PCA (Biplot) graph for components PC2 and PC3

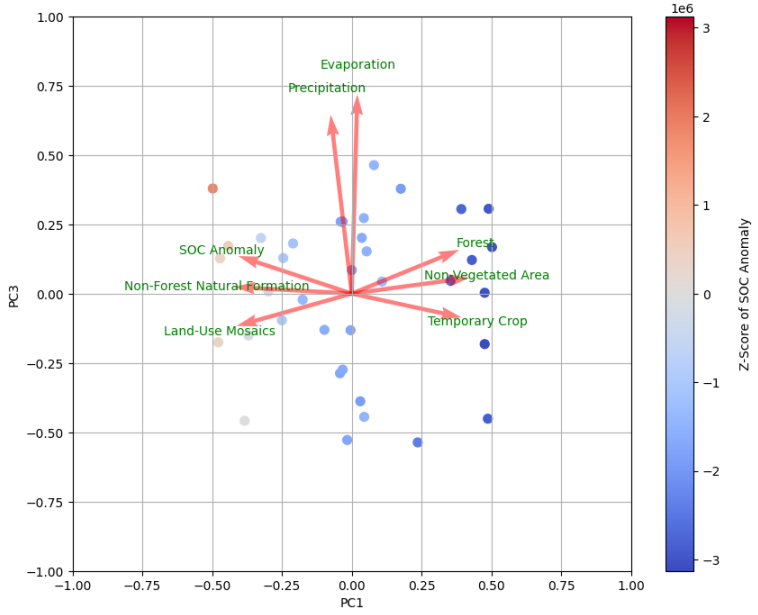


Figure 4 – PCA (Biplot) graph for components PC1 and PC3

4. Discussion

- *Temporal Variation of Land Use Classes*

The analysis revealed significant transformations in land use and land cover in the study area between 1985 and 2023, with changes corresponding to 24% of the total

area. The alteration in land use classes represented approximately 2,439.63 km² out of the 10,131.93 km² studied.

The forest class showed an overall increase despite an initial decline, which is a relevant factor for the conservation of the Atlantic Forest, a biome that has lost a significant portion of its territory [22]. Pasture areas and land-use mosaics recorded substantial reductions, particularly in the last analyzed period. The significant expansion of non-vegetated areas, however, occurred at a declining growth rate, mirroring the trend observed in the state of Rio de Janeiro [10].

The substantial loss in the non-forest natural formation class is a point of concern, as a significant portion of the Atlantic Forest remnants fall within this class. The conversion of pastures into agricultural areas, such as land-use mosaics, was also prominent due to the high conversion rates in the study area and across the biome. Temporary crops and forestry showed high growth rates, as observed throughout the biome [23].

The expansion of land-use mosaics and pastures into forested and non-forest natural formation areas, as well as the fragmentation of these environments, leads to the loss of natural habitat remnants. This process is further intensified by the transition between pastures and land-use mosaics. Water bodies showed expansion, albeit at decreasing rates over time, which may be related to variations in precipitation patterns and nearby land uses [9].

The transition matrix highlighted that forests were converted into various classes but also received significant contributions from land-use mosaics and pastures. Maps of land use and land cover visually demonstrated the increase in non-vegetated areas and the reduction of pasture and land-use mosaic areas.

- *Variation in Soil Carbon Stock by Land Use Class*

The analysis revealed significant changes in soil carbon stock in the study area between 1985 and 2021, with a total deficit of 4,631,328.39 tons of carbon. Classes such as Forests, Temporary Crops, and Forestry contributed positively to carbon stock, recording increases of 430,959.58, 23,515.84, and 1,387.89 tons, respectively, functioning as carbon sinks. In contrast, classes such as Non-Forest Natural Formation, Pasture, Land-Use Mosaics, Non-Vegetated Areas, and Water Bodies exhibited significant carbon losses, with Pasture showing the most substantial reduction of 1,963,549.18 tons.

Comparatively, the deficit in the study area was higher than that recorded in the state of Rio de Janeiro, which lost 2,153,334.68 tons. The negative growth rate of carbon stock was -9.26% in the study area, surpassing the state rate of -1.01%.

The highest rates of carbon stock increase were observed in Temporary Crops (14,743.85%) and Forestry (6,001.99%), although these categories represent a smaller fraction of the territory and absolute carbon stock. When properly managed, Temporary Crops contribute to the increase in Soil Organic Carbon (SOC), while Forestry stands out as one of the most effective practices for carbon sequestration, reinforcing the relevance of adequate agricultural strategies to enhance SOC [24].

Forests showed a slight increase in carbon stock (1.74%), while other classes experienced significant reductions. Notably, Non-Vegetated Areas, which decreased by 71.96% [11], exhibited a significant decline in SOC content and stock as urbanization expanded.

- *Principal Component Analysis (PCA)*

The reduction in SOC anomalies throughout the historical series may be linked to land-use changes, such as the expansion of Non-Vegetated Areas. The conversion of natural areas into exposed surfaces may contribute to the decline in soil carbon stocks. On the other hand, areas with natural vegetation, such as Forests and Non-Forest Natural Formation, exhibit a higher potential for SOC preservation, whereas pastures, urban areas, and agricultural lands have a weaker correlation with this process [25].

Climatic variables play a complementary role. Precipitation can enhance moisture conditions, favoring carbon retention in the soil. Conversely, evaporation can intensify degradation processes, especially in exposed areas. The interaction between these variables suggests that higher moisture levels favor SOC maintenance, while increased evaporation rates can reduce carbon retention, making the soil more susceptible to organic matter loss.

5. Conclusions

The results highlighted the dynamics of transitions between land-use classes and their relationship with SOC. The first analysis revealed that 24% of the studied area underwent significant land-use changes, with increases in forests, temporary crops, forestry, non-vegetated areas, and water bodies of 168.15, 4.66, 0.79, 847.35, and 3.46 km², respectively, while pastures and land-use mosaics decreased by 163.26 km² and 520.46 km². These transitions reflect anthropogenic pressures and environmental recovery efforts, contributing to SOC changes.

The transition matrix from 1985 to 2023 showed that forests were primarily converted into Land-Use Mosaics (219.45 km²) and pastures (94.93 km²). Pastures declined, transitioning into Land-Use Mosaics (487.87 km²), Non-Vegetated Areas (134.41 km²), and forests (82.88 km²). Land-Use Mosaics lost land to pastures (456.06 km²), forests (390.33 km²), and Non-Vegetated Areas (384.81 km²). Non-Vegetated Areas expanded by 552.65 km², receiving 384.81 km² from Land-Use Mosaics and 132.41 km² from pastures.

The second analysis quantified carbon stock by class, revealing that forests, temporary crops, and forestry acted as carbon sinks, contributing 430,959.58, 23,515.84, and 1,387.89 tons, respectively. In contrast, non-forest natural formations, pastures, land-use mosaics, non-vegetated areas, and water bodies lost 770,785.75, 1,963,549.18, 1,364,026.26, 736,216.60, and 252,613.91 tons, resulting in a 9.26% reduction in initial carbon stock. However, the extent of these areas also influences total carbon stocks.

The principal component analysis highlighted that forests and non-forest natural formations contribute positively to SOC, whereas temporary crops and non-vegetated areas are associated with its reduction. Additionally, precipitation favors carbon retention, whereas evaporation may intensify its loss.

Author Contributions: Conceptualization, Anna Baker and Gabriel Silva; methodology, Anna Baker, Flávio Silva, André Belém, and Daiane Cecchin; software, Anna Baker; validation, Flávio Silva, André Belém, and Daiane Cecchin; formal analysis, Flávio Silva and André Belém; investigation, Anna Baker; data curation, Daiane Cecchin; writing – original draft, Anna Baker and Gabriel Silva; writing – review and editing, Anna Baker and Gabriel Silva; supervision, Flávio Silva and André Belém; project administration, Anna Baker. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement: Data Availability Statement: Land-use and land-cover data are available in the MapBiomas User Toolkit. Soil carbon data can be accessed in the MapBiomas User Toolkit - Solo. Climate data from TerraClimate are available at TerraClimate. The codes used in Google Earth Engine can be found in the GitHub.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Norat, M.S.L. Mudanças climáticas e seus impactos: contextualização, evidências e desafios para a sustentabilidade. Scientia et Ratio 2023, 3, 4.
2. Hansen, J. Storms of My Grandchildren: the Truth About the Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity; Bloomsbury Press: New York, NY, USA, 2009.
3. Leite, N.M.S.; Souza, P.M.; Fornazier, A.; Souza, H.M.; Ponciano, N.J. Mudanças climáticas e seus impactos: contextualização, evidências e desafios para a sustentabilidade. Scientia et Ratio 2019, 7, 1, 10–25.
4. Fialho, E.S.; Machado, L.A. Classificação climática do estado do Rio de Janeiro: revisão, reanálise e reflexões. Revista Continentes 2024, 23, 367–390.

5. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Classificação do relevo para fins de levantamento de solos; Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos: Rio de Janeiro, Brasil, 1979. (Embrapa-SNLCS. Miscelânea, 1).
6. Prado, L.A.; Miziara, F.; Ferreira, M.E. Expansão da fronteira agrícola e mudanças no uso do solo na região sul de Goiás: ação antrópica e características naturais do espaço. Bol. Goiano Geogr. 2012, 32, 1, 151–165.
7. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Agropecuário 2017: resultados preliminares. IBGE, 2017.
8. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Contas Econômicas Ambientais: o Uso da Terra nos Biomas Brasileiros, 2000-2018. Contas Nacionais 2020, 73.
9. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil 2018/2020; IBGE: Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
10. Pereira, R.S.; Cordeiro, R.C.; Santos, E.S.; Bidone, E.D. Urbanização, tendências ambientais e socioeconômicas em uma zona costeira sob o enfoque do Antropoceno: 1940-2020 (Bacia Hidrográfica da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brasil). Rev. Bras. Gest. Desenv. Reg. 2021, 17, 2.
11. Zhang, F.; Zhong, J.; Zhao, Y.; Cai, C.; Liu, W.; Wang, Q.; Wang, W.; Wang, H.; Jiang, X.; Yuan, R. Urbanization-induced soil organic carbon loss and microbial-enzymatic drivers: insights from aggregate size classes in Nanchang city, China. Front. Microbiol. 2024, 15.
12. Francisco, P.R.M.; Santos, D.; Ribeiro, G.N.; Silva, V.F.; Ayres, G.D.J.; Rodrigues, R.C.M. Dinâmica temporal da cobertura e uso das terras do estado da Paraíba utilizando Mapbiomas. Rev. GEAMA 2025, 37, 1, 91–110.
13. Abatzoglou, J.T.; Dobrowski, S.Z.; Parks, S.A.; Hegewisch, K.C. TerraClimate: um conjunto de dados globais de alta resolução do clima mensal e do balanço hídrico climático de 1958-2015. Sci. Data 2018, 5, 170191.
14. Nascimento, M.B.; Silva, I.W.H.; Silva, C.M.S. Normas climatológicas da precipitação pluviométrica nos municípios de João Pessoa e Campina Grande, estado da Paraíba, entre 1981 e 2020. Rev. Geonorte 2024, 15, 50, 91–110.
15. Batty, M.; Cheshire, J. Cities as flows, cities of flows. Environ. Plan. B Plan. Des. 2011, 38, 2, 195–196.
16. Silva, B.C.; Silva, W.V.; Santos, E.P.; Santos, B.Z.; Silva, L.L.; Reis, A.M.H.; Samuel-Rosa, A.; Horst, T.Z. MapBiomas Solos: revelando a dinâmica espaço-temporal dos estoques de carbono no solo e suas relações com as mudanças no clima e na cobertura e uso da terra no Brasil. In Proceedings of the 20th Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2023.
17. Batista, D.S. et al. Análise de componentes principais dos atributos químicos do solo de um fragmento preservado de Cerrado. Nat. Conserv. 2021, 14, 1, 1–10.
18. Santi, A.L.; Amado, T.J.C.; Cherubin, M.R.; Martin, T.N.; Pires, J.L.; Flora, L.P.D.; Basso, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. Pesq. Agropec. Bras. 2012, 47, 9.
19. Kendall, M.G. A new measure of rank correlation. Biometrika 1938, 30, 81–93.
20. Johnson, R.A.; Wichern, D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis, 4th ed.; Prentice-Hall: New Jersey, USA, 1998.
21. Morrison, D.F. Multivariate Statistical Methods, 4th ed.; Duxbury Press: New York, USA, 2003.
22. Ribeiro, M.C.; Metzger, J.P.; Martensen, A.C.; Ponzoni, F.J.; Hirota, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. Biol. Conserv. 2009, 142, 1141–1153.
23. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Contas econômicas ambientais: o uso da terra nos biomas brasileiros, 2000–2018. Contas Nacionais 2020, 73.
24. Carvalho, J.L.N.; Avanzi, J.C.; Silva, M.L.N.; Mello, C.R.; Cerri, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. Rev. Bras. Ciênc. Solo 2010, 34, 277–290.
25. Crivelari-Costa, P.M.; Lima, M.; La Scala Jr., N. et al. Changes in Carbon Dioxide Balance Associated with Land Use and Land Cover in Brazilian Legal Amazon Based on Remotely Sensed Imagery. Remote Sens. 2023, 15, 2780.

Desenvolvimento de uma máquina lavadora de rizomas

Raphael MG Moreira[1]; Sávio da S. Berili[2]; Ana Paula CG Berilli[3]; Laila C. Bonjardim[4]; Ana Clara G. Pereira[5]; Sara de S. Manso[6]; Rainer N. Anselmo[7]; Carolina Brunelli[8]; Larissa H Vieira[9]

[1] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Itapina; raphael.morieira@ifes.edu.br; +5531996120792

[2] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Alegre; savio.berilli@ifes.edu.br

[3] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Alegre; ana.berilli@ifes.edu.br

[4] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Colatina; laila.bonjardim@ifes.edu.br

[5] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Itapina; anaclara.engagronomia@gmail.com

[6] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Itapina; saraagro2021@gmail.com

[7] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Itapina; rainernicchio0@gmail.com

[8] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Itapina; carolineeng.agronomica@gmail.com

[9] Instituto Federal do Espírito Santo/Campus Itapina; larissa.vieira@ifes.edu.br

Resumo: Uma solução viável para a agricultura familiar e pequenos produtores de gengibre, em particular, é o estudo na área de engenharia agrícola baseado na busca patentária e na pesquisa em artigos para o desenvolvimento e adaptação de máquinas destinadas à lavagem dos rizomas. Assim, este trabalho tem como objetivo atender à demanda levantada pelos produtores e exportadores de gengibre do Espírito Santo, Estado que é o maior exportador do Brasil e possui uma das melhores qualidades do mundo. As visitas aos produtores de gengibre possibilitaram verificar as tecnologias atualmente utilizadas e identificar seus principais entraves. A segunda etapa consistiu na compilação de diferentes metodologias de projeto para o desenvolvimento de protótipos, produtos e processos. Por fim, iniciou-se a construção virtual do lavador e sua impressão em 3D. A fase da busca sistematizada em bancos de patentes, teve o intuito de organizar, categorizar e analisar criticamente as tecnologias. A partir dos dados, elaboraram-se uma lista de requisitos, a matriz morfológica de funções, subfunções e soluções, além das variantes, seu julgamento e escolha do lavador mais viável, enfatizando também fatores como eficiência, economia de recursos, praticidade de manuseio, manutenção facilitada, baixo custo e sustentabilidade.

Keywords: Higienização de gengibre; Prototipagem; Mecanização Agrícola; Projeto de máquinas

1. Introdução

Conhecida desde a antiguidade como especiaria e planta medicinal, o gengibre pertence à família Zingiberaceae, que é composta por mil e quatrocentas (1400)

espécies, e tem o nome científico Zingiber officinale Roscoe, é uma monocotiledônea, com origem Asiática [4]. O gengibre é considerado uma planta herbácea perene, cujo rizoma é amplamente comercializado em função de seu emprego alimentar e industrial, especialmente como matéria prima para fabricação de bebidas, perfumes e produtos de confeitaria [8; 16; 10; 20; 23; 5].

O maior produtor e exportador de gengibre é a Nigéria, seguido por Índia e China, com 56%, 23,6% e 4,47% respectivamente [16]. Mesmo não sendo um dos maiores exportadores, o Brasil só consegue competir em virtude do reconhecido padrão de qualidade do seu produto [5]. Atualmente o Estado do Espírito Santo no Sudeste Brasileiro é o maior produtor nacional de gengibre, sendo responsável por 60% da produção nacional e 80% das exportações brasileiras deste produto, garantindo, com isso, emprego e renda para os produtores rurais. Existem mais de 300 hectares plantados e aproximadamente 1.000 famílias envolvidas diretamente e indiretamente com essa atividade [11], sendo o comércio internacional do gengibre, normalmente, realizado sob três formas básicas: produto in natura, em conserva ou cristalizado e seco.

O gengibre brasileiro é exportado basicamente na forma in natura, sendo os principais países compradores os Estados Unidos, Países Baixos, Reino Unido, Canadá, Itália, França e Alemanha [29; 6; 5]. Sabendo-se que a garantia de manutenção deste mercado está intimamente ligada à qualidade do produto agrícola oferecido ao consumidor, estudos com a cultura do gengibre são muito importantes para o aperfeiçoamento da produção nacional.

A lavagem e limpeza dos rizomas, realizado para remover sujeiras, resíduos de pulverização e outros materiais, visa melhorar o aspecto comercial do produto [13; 7]. De acordo com [7], é sugerido que se construam lavadores que estejam em conformidade com as normas ambientais, a fim de assegurar o destino apropriado dos resíduos sólidos. Usualmente, o processo de lavagem do gengibre é realizado de forma onerosa e com elevado gasto de água, através do uso de mangueiras [26; 5] e máquinas rústicas, sem qualquer fundamento de engenharia e produzidas nas próprias propriedades, sendo cópias adaptadas em propriedades rurais de máquinas estrangeiras, principalmente chinesas e indianas, não levando em conta a realidade brasileira, tornando-as inviáveis aos pequenos e médios produtores rurais [19; 17; 18].

Ao observar a pós-colheita do gengibre, Souza (2015) descreve que os rizomas devem ser lavados com águas livres de contaminações, secos em locais sombreados, e que o processo fundamental da retirada de solo deve ser feito com

o objetivo de elevar a vida útil, principalmente evitando ferimentos que podem ser consideradas “portas de entradas para patógenos”.

A capacidade criativa associada a uma ou mais metodologias para o desenvolvimento de um projeto visa atender ao máximo às necessidades dos usuários e os projetistas diminuindo riscos de forma significativa, com o retorno máximo que uma inovação pode trazer aos usuários só será alcançado com auxílio das diretrizes propostas pelas diferentes metodologias [21; 12; 18]. A aceitação de um produto inovador deve ser fruto da troca de informações entre os projetistas e os agricultores, já que a demanda parte de uma necessidade específica no manejo das operações no campo [1; 2; 18] As metodologias de projeto para o desenvolvimento de máquinas agrícolas podem ser divididas em Planejamento do Projeto, Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado, Preparação da Produção e Lançamento do Produto, com a flexibilidade da gestão do projeto proporcionando maiores condições de se obter um produto mais inovador [3; 24; 26; 28; 18]

Este trabalho é resultado do estudo que teve como objetivo realizar um levantamento abrangente de tecnologias com fins similares ao do lavador proposto, tanto em textos técnicos quanto científicos, para embasar a construção de um levantamento patentário que serviu como referência para o desenvolvimento do projeto preliminar. Em seguida, foi confeccionada uma lista de requisitos do equipamento, seguida pela criação de uma matriz morfológica que detalhará as funções, subfunções e soluções possíveis. Com base nessa matriz, foram desenvolvidas variantes do equipamento, as quais serão submetidas a um julgamento pela equipe do projeto para selecionar as melhores opções, garantindo assim a eficácia e a viabilidade da solução final. Após estas etapas, partiu-se para a construção virtual das partes e peças do lavador e posteriormente sua impressão em 3D e construção em escala real.

2. Material e Métodos

- *Projeto Informacional*

Com base nas informações agrupadas durante o Planejamento, no qual as necessidades e os requisitos foram verificados, foi iniciado o Projeto Informacional, que consistiu basicamente da busca por princípios de funcionamento que englobam: realizar buscas sobre o estado da tecnologia em visitas técnicas, exposições, boletins, catálogos, patentes, entre outros; realizar análise dos sistemas técnicos conhecidos através da análise de produtos concorrente e obsoletos similares; avaliar e criticar a inter-relação entre as soluções existentes, o princípio de funcionamento e o problema em questão. Pela sua elevada importância, o

Estado da Arte foi contemplado no artigo anterior isoladamente, mas sendo levado em consideração na etapa seguinte denominada Projeto Conceitual. O primeiro passo que será dado é a ação prática de visitação aos produtores rurais de gengibre na região serrana do ES. Tais visitações serão feitas em propriedades que possuem algum tecnificação na etapa de lavação do rizoma de forma semi mecanizada ou mecanizada.

A segunda fase será a realização da busca de patentes que apresentavam qualquer relação com o nosso projeto. A busca de patentes relacionadas ao projeto será realizada em sites da internet como em literaturas físicas. Os principais sítios online de pesquisa utilizados neste trabalho foram: - O Google Patents, ferramenta secundaria do google onde disponibiliza todas as patentes registradas e autenticadas (https://patents.google.com); - O CNPI- Comissão permanente de Propriedade Intelectual, banco de patentes de grande relevância, que oferece total apoio ao ramo pesquisa e auxilia de forma a evitar, que nosso esforço seja desperdiçado no desenvolvimento de tecnologias que já existe (http://www.inpi.gov.br/). - Os sítios de pesquisa EPO, escritório de pesquisa de patentes europeu e outros, como o Derwent Innovations Index, WIPO/Patentscope; Europa/Espacenet; EUA/USPTO; Japão/JPO; LATIPAT/Espacenet e o site oficial de patentes chinês, China Patent&Trademark Office (http://www.epo.org/; https://worldwide.espacenet.com/advancedSearch?locale=en_EP; https://clarivate.com/w ebofsciencegroup/solutions/webofscience-derwent-innovation-index/; https://patentscope.wipo.int/search/en/st ructuredSearch.jsf; https://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/search-bool.html; https://lp.espacenet.com/advancedSe arch?locale=pt_LP; https://www.chinatrademarkoffice.com/).

Para as buscas, serão utilizados termos chaves similares aos: gengibre, lavagem de rizoma, Zingiber officinale, ginger(inglês), Zenzero (italiano), Jengibre (espanhol), 姜 (chinês), अदरक (indiano). Será utilizado a ferramenta de tradução do google para facilitar o processo de tradução dos arquivos encontrados. A partir deste levantamento, a hipótese é que a equipe terá embasamento teórico necessário para iniciar o trabalho de forma que não sobrepusesse qualquer outro maquinário já desenvolvido. A equipe de projeto foi direcionada para trabalhos com estruturas mais tecnológicas até trabalhos baseados em maquinários/implementos mais simples, seguindo e adaptando a metodologia de projeto proposta por [21].

- *Projeto Conceitual*

Após reunir as informações das etapas anteriores, partiu-se para o Projeto Conceitual, que é considerado como a fase mais importante [23] e é compreendido

pela construção da Lista de Requisitos. Esta foi elaborada com base nas etapas de informação, definição, criação, avaliação e decisão, na tentativa de responder aos questionamentos relativos à finalidade que a solução precisa satisfazer e quais as características devem apresentar [22]. A lista foi formulada estabelecendo-se os requisitos a serem apresentados pelo projeto do protótipo lavador ao ser concluído, desconsiderando as críticas quanto à viabilidade técnica ou econômica. Esta lista pode ser modificada a qualquer momento com o desenvolvimento do projeto, mas as modificações devem ser apresentadas de acordo com dia e hora até o momento de sua realização. Ao final do projeto, ocorre a avaliação sobre o atendimento ou não do protótipo aos requisitos propostos. O não atendimento revela que houve algum erro na fase de projeto ou na Lista de Requisitos, que deverá ser refeita.

Seguindo parte da metodologia proposta por [22], realizou-se a construção de uma Matriz de Subfunções, na qual foram criadas funções específicas que o protótipo deverá realizar durante o seu funcionamento para que se alcance o objetivo proposto pela equipe de projeto. As funções são definidas por verbos, como por exemplo: lavar, recircular, estruturar, energizar, sustentar e outros, e seus substantivos com os possíveis mecanismos. Após gerar as subfunções e listar seus vários mecanismos solucionadores, será escolhida a solução ou mecanismo para cada subfunção que melhor se ajuste, resultando em um agrupamento denominado Variante de Solução. Quanto maior o número de variantes propostas, maior será a possibilidade de criação de uma solução de projeto que atenda à totalidade das tarefas para as quais o protótipo será idealizado. Porém, a complexidade está diretamente ligada à quantidade de variantes propostas [22].

As variantes que serão previamente escolhidas pela equipe de projeto serão avaliadas para detalhamento dos pontos positivos e negativos das soluções propostas por critérios, por exemplo: Ser de baixo custo de construção, baixo custo de operação, lavagem eficiente, fácil operação, tecnologia empregada, fácil operação de deslocamento dentro da lavoura, fácil manutenção, elevada confiabilidade, baixo gasto de energia, baixo consumo de água, possibilidade de mudança no sistema de pressão, peças de fácil fabricação e reposição dos componentes, entre outras.

As variantes serão avaliadas através de julgamento e da atribuição de um valor com peso para cada mecanismo utilizado em cada uma das subfunções, o que possibilitou definir as prioridades no projeto do lavador. Para definição da melhor variante foi utilizado o método da atribuição de notas para os mecanismos de cada subfunção do lavador. As notas são atribuídas da maior (5), quando ocorreu a superação das expectativas da subfunção, para a menor (0), referente ao não cumprimento da tarefa. Cada nota foi dada analisando-se fatores lógicos, não

podendo ser comparada com notas dadas para mecanismos já usados na mesma subfunção de outra variante.

- *Projeto Preliminar*

No Projeto Preliminar será definida a arquitetura do protótipo correspondente à variante, ou às variantes, que obtiveram as maiores notas geradas com as informações das fases anteriores. A definição da lavadora servirá para a compreensão de toda a parte estrutural. A etapa de criação da solução em plataforma CAD será para o entendimento das interações existentes entre as partes constituintes e melhor construção dos mecanismos virtuais. Nesta etapa, o projeto será realizado de acordo com critérios técnicos e econômicos. Deste ponto em diante, o modelo do protótipo evolui da concepção ao desenho definitivo de um produto virtual, ressaltando que a equipe pode a qualquer momento fazer alterações justificadas no projeto.

Em reuniões da equipe de projeto com os demandantes, produtores de gengibre, as soluções propostas serão interligadas gerando algumas planilhas com variantes e esboços. Os esboços manuais serão desenhados em um quadro branco e flipchart, permitindo que as ideias fossem julgadas, adaptadas e resultando em um único esboço. Este servirá como base para a construção do protótipo virtual em plataforma CAD (projeto auxiliado por computador) do lavador de gengibre.

- *Projeto Detalhado e Determinação das características técnicas do protótipo virtual*

Esta etapa se encontra intimamente ligada às anteriores, pois as peças geradas com suas dimensões, tolerâncias e juntas ou articulações alcançam o desenvolvimento do protótipo virtual, sendo finalmente caracterizados os materiais, fixados todos os mecanismos e com a possibilidade de ser verificada a lavadora virtual em CAD, construído em escala real. Previamente, deverá ser realizada a revisão de produtos existentes com fins similares ao do protótipo proposto, determinando aspectos de segurança e eficiência da adaptação proposta. Serão realizados estudos sobre o projeto para: verificação de demandas e melhorias por parte dos agricultores que potencialmente utilizarão a máquina; disponibilidade de materiais e ferramentas para fabricação do lavador.

- *Construção do protótipo em escala reduzida, Impressão 3D e construção do lavador em escala real*

De posse das partes virtuais do sistema de lavagem de gengibre, será realizada a conversão para escala reduzida e sua impressão em impressora 3D. O objetivo é que o arquétipo, possa servir como meio de divulgação em eventos técnicos, para

fomentar a transferência da tecnologia para empresas do setor, permitindo assim, a concessão da patente para que o setor privado possa construir e comercializar o equipamento para pequenos e agricultores familiares. Após a validação dos protótipos virtuais, partiu-se para a construção em escala real do lavador em oficina mecânica especializada.

3. Resultados e Discussões

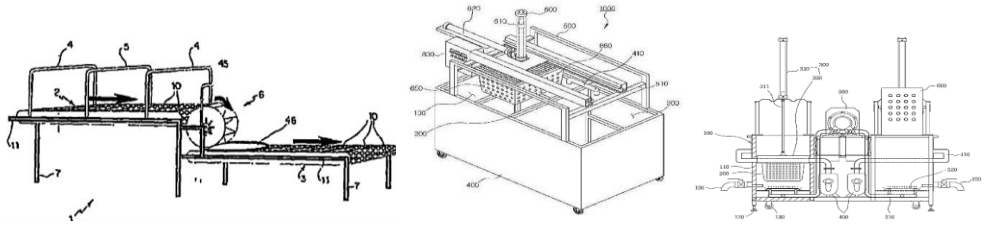
As visitas foram realizadas em 12 propriedades, que incluíram instalações com máquinas de lavagem linear e circulares, tendo a oportunidade de visitar também o fabricante dessas máquinas. No decorrer da visita na região, foram observadas máquinas específicas para a lavagem do gengibre (FIGURA 1), produzidas por um responsável local, abordando questões pertinentes e sanando dúvidas de como poderíamos aprimorar a máquina e auxiliar o produtor diante as dificuldades.

Figura 1. Algumas das tecnologias que foram observadas nas visitas.

Após verificar o estágio de desenvolvimento das máquinas utilizadas para lavagem do gengibre, desencadeou-se a elaboração do projeto preliminar, com a busca de tecnologias em depósitos patentes e a crítica sobre o que poderia ser viável na lavadora, foco deste trabalho. Esta etapa foi de suma importância, pois trouxe um embasamento teórico para não sobrepor máquinas já desenvolvidas, o que economizaria tempo e recursos.

Esta é uma patente nacional (Figura 2a), a primeira a ser encontrada, nela os rizomas são depositados sobre uma esteira telada onde jatos de água são direcionados aos mesmos, ao final da primeira esteira o mecanismo de tombamento 180 graus para que os rizomas possam ser higienizados de ambos os lados. O mecanismo de tombamento nos trouxe a referência da necessidade que a lavagem fosse feita em duas etapas. Porem em testes realizados pela equipe foi constatado que rizomas não resistiam a impacto e se partiam em peças menores fazendo-se não compatível ao padrão exportação. A lavadora de legumes (Figura 2b), nos trouxe a ideia de dois compartimentos para realizar a limpeza dos rizomas, o primeiro responsável pela retirada da parte mais grosseira e o segundo realiza o enxague. A limpeza e realizada através de agitação vertical, com os rizomas submersos a lavagem ocorreria simultaneamente em todos os lados, entretanto a resistência de movimento produzida pela água nos leva novamente a quebra do gengibre.

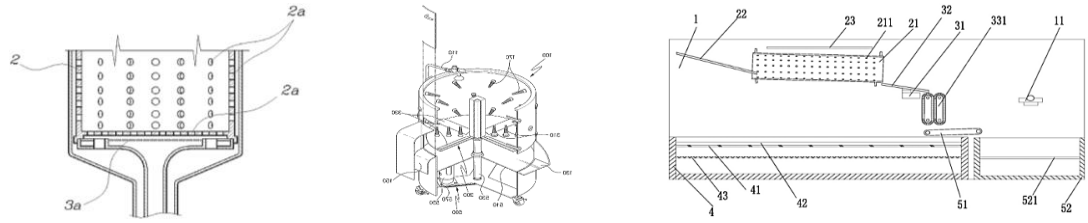
Semelhante a patente da figura 2b, está (Figura 3a) também tem seu funcionamento baseado no movimento vertical e traz como ideia o acréscimo de bolhas de ar que auxiliam no desprendimento dos resíduos de solo junto ao gengibre.



(a) (b) (c)

Figura 2. Máquinas a) BRPI9703346, b) KR1020170040545 e c) KR1020090058639 Lavadora de legumes.

A patente (Figura 3b) tem seu funciona basicamente pelo fornecimento de bolhar de ar, a ideia e que as bolhas façam com que as sujeiras sejam retiradas. A patente (Figura 4a) trouxe como requisito principal não ferir a pele dos frutos durante o processo de lavagem, o que para nós é também um dos principais requisitos pois cada ferimento pode ser porta de entrada para fungos oportunistas, causando um dano direto ao produto comercial. Para a invenção (Figura 4b), a limpeza ocorre através do tambor rotativo inclinado com fornecimento de água na parte superior. Novamente nos deparamos com problema de impacto, pois os rizomas não resistem ao movimento de rotação. A patente conta com mecanismo que retem toda água utilizada no processo, possibilitando seu tratamento e reutilização no processo de beneficiamento do gengibre.



(a) (b) (c)

Figura 3. Máquinas a) KR100622525 Máquina de lavar vegetais, b) KR1020100038495 e c) CN109259270A

De posse destes dados, a equipe partiu para o projeto conceitual, estabelecendo alguns objetivos que darão ao lavador a definição de funções e a execução de tarefas, para garantir que o projeto atenda todas as demandas específicas de maneira eficaz (QUADRO 1).

Quadro 1 - Lista de requisitos:

● Capacidade operacional eficaz ● Se adequar a vários formatos de rizomas ● Permitir diferente configurações ● Adequar aos diversos tipos de sujeira ● Sistema de filtragem ● Monte e desmonte simplificado	● Material não corrosivos ● Comandos de controles independentes ● Segurança do operador ● Baixo custo de aquisição ● Baixo custo de manutenção ● Partes e peças de fácil acesso

Conforme foi possível observar, para a lavadora ser eficaz, é importante determinar a quantidade de rizomas que serão processados por hora para definir a capacidade da máquina, levando em consideração também o tipo de rizoma a ser lavado o que dará o tipo de máquina e configuração de lavagem necessários. O tipo de sujeira encontrada está associado ao tipo de solo e impurezas encontradas no gengibre, após a colheita, pois assim o processo de lavagem será adequado, sendo a máquina com sistema de lavagem feito para remover tais resíduos no rizoma de forma eficiente e econômica, utilizando jatos de água, escovas como ou combinação de ambos, havendo também a flexibilidade de se adaptar às diferentes características do gengibre, visando sempre manter uma lavagem otimizada. Com um sistema de filtragem para retirar os resíduos soltos durante o processo, mantendo uma qualidade no produto final e minimizando o acúmulo de sujeira na máquina que pode ocasionar manutenções frequentes.

Os materiais devem ser resistentes e duráveis que possam suportar a exposição à água e aos produtos químicos de limpeza, de preferência sustentáveis e com baixo impacto ambiental em caso de precisar de troca da peça, com controles e sensores com interface de usuário intuitiva e fácil de entender, com instruções claras para operação como, ajustar velocidade de lavagem, pressão da água, tempo de lavagem, assim contribuindo para um consumo mínimo de água e energia. A máquina deve conter dispositivos de segurança, como sensores de nível de água, alarmes e interruptores de emergência incorporados na mesma, ser de fácil manutenção para evitar acidentes aos operadores durante todo o processo. Além disso, como o lavador projetado visa atender aos pequenos e médios produtores, o baixo custo é indispensável para que atenda às demandas do mercado, sendo acessível em relação a sua capacidade de processamento e qualidade de limpeza.

Sobre matriz morfológica, é uma tabela que inclui separar uma função em subfunções, dando soluções que atendem o objetivo do produto final. Esse método traz uma visão ampla de várias opções em estudo, e muitas vezes com a interação demais subfunções resulta em ideias inovadoras [14].

Soluções Subfunções	1	2	3	4	5	6
Girar a máquina	Motor Elétrico	Motor à combustão	Impacto	Jatos		
Suportar gengibres	Chapa metálica	Tela metálica	Tela de borracha	Esteira rolante	Tambor rotativo	
Estruturar o chassi	Circular	Retangular	Helicoide	Linear		
Transmissão de movimento	Engrenagem com parafuso sem fim	Engrenagens cilíndricas	Rolamentos	Pinhão e coroa	Cabo de aço	Polias
Retirar a sujeira	Jatos de água	Vibração	Ventilador	Bolhas de ar	Escovas	
Detectar sujeira	Sensor de imagem	Sensor de proximidade	Manual			
Controle do tempo de lavagem	Sensor do nível da sujeira	Timer mecânico	Timer digital	Manual		
Separar sujeira da água utilizada	Filtro de areia	Filtro de gravidade	Aspiração	Filtro de disco	Filtro de tela	
Recolher a água	Tubulações	Calhas	Bomba	Dreno		
Desinfectar/Reutilizar	Bicarbonato de sódio	Água sanitária	Água oxigenada	Água e vinagre	Ozônio	UV
Forma geométrica	Circular duplex	Circular simples	Helicoide	Linear	Ovoide	

Levando em considerações as patentes analisadas, a lista de requisitos e a matriz morfológica, foram idealizadas possíveis variantes para o projeto. Com isso, a equipe foi identificando pontos positivos, de acordo com a lista de requisitos, e feito o julgamento das melhores seguindo os critérios e experiência da equipe de projeto. O modelo circular duplex, retiram a sujeira somente com a pressão da água, sem auxílio de escovas ou similares, tornando necessário que os rizomas passem pelo processo de lavagem, em até duas vezes, com mecanismo que possibilite recolher a água utilizada e que a mesma possa ser tratada, reutilizada ou descartada de forma correta.

No instrumento circular, encontrado em uma das propriedades, o movimento é induzido pela pressão da água em contato com o gengibre, ou manualmente pelo operador. As sujidades são removidas somente com jato de água sem suporte de escovas ou similares, sem dreno para recolher a água utilizada, sem tratamento da água, para que essa água possa ser reutilizada de outra forma ou até mesmo para

a pré-lavagem. Na máquina linear também é realizada a lavagem somente com uma pressão da água.

Passo a passo para o fatiamento das imagens:

1. Configuração inicial: após a instalação no site oficial do software, deve-se realizar a configuração manualmente, inserindo o tamanho da mesa de impressão e a altura da impressora.
2. Importação do modelo 3D: Importar o arquivo do modelo 3D no fatiador Cura.
3. Ajuste do modelo: Centralizar o desenho na impressora numa escala de 10%.
4. Configuração de impressão: Configurar o perfil (qualidade, temperatura, preenchimento).
5. Pré visualização: Após todo processo coloque para fatiar.
6. Gerar Gcode: Quando estiver tudo correto basta gerar o código Gcode e salva-lo.

As imagens construídas no SolidWorks (Figuras 4a, 4b, 4c e 4d), após serem fatiadas no programa Cura (Figura 5a), foram enviadas para o software da impressora 3D (Figuras 5b e 5c) utilizada no projeto, no momento da impressão.

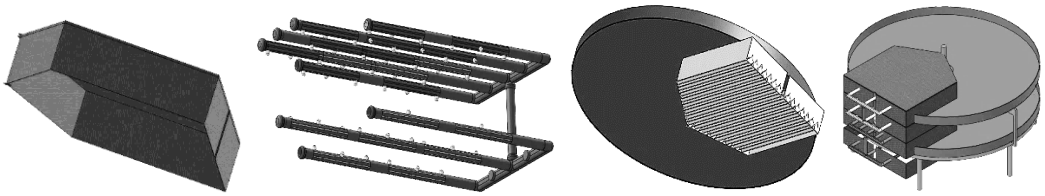
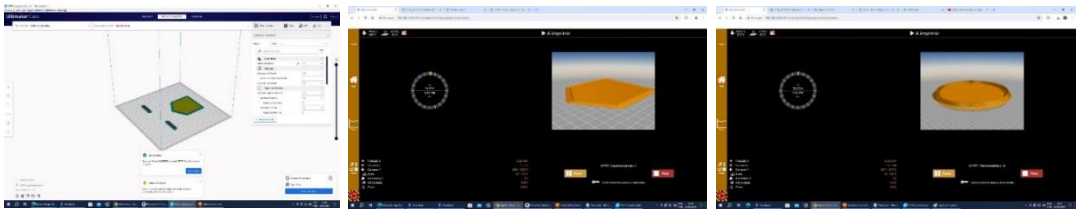
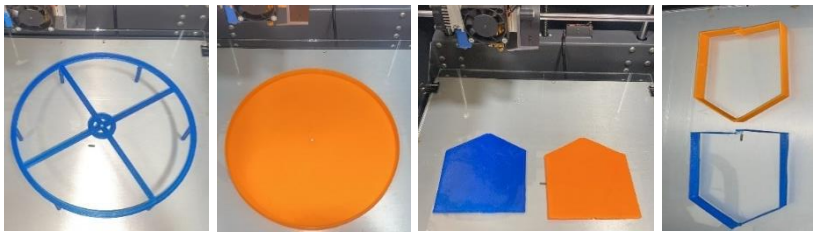


Figura 4. Partes do Lavador idealizado neste trabalho, a) Campânulas, b) Tubulações dos sistemas de lavagem com água limpa e residuária, c) Tela suporte dos gengibres com calha recolhedora de água residuária e d) lavador duplex completo em perspectiva.



Figuras 5. Prints do a) programa Cura com a Capa campânula, Suporte entre chapas e do programa da impressora 3D com a b) Tela furada e Base maior.

Com o envio das peças e partes virtuais para a impressora 3D, iniciou-se o processo lento e delicado de impressão de cada uma das peças (Figura 6). Cabe ressaltar que esta etapa foi retroalimentada pela necessidade de reconstrução das peças e partes virtuais construídas no programa solidwork.



Figuras 6. a) Chassi, b) tela de sustentação dos gengibres, c) tampas das d) campânulas

Após validação dos produtores, os desenhos e modelos impressos do lavador foram levados para oficina mecânica especializada para sua construção em escala real (Figura 7)

Figuras 7. Lavador em escala real construído, sendo testado.

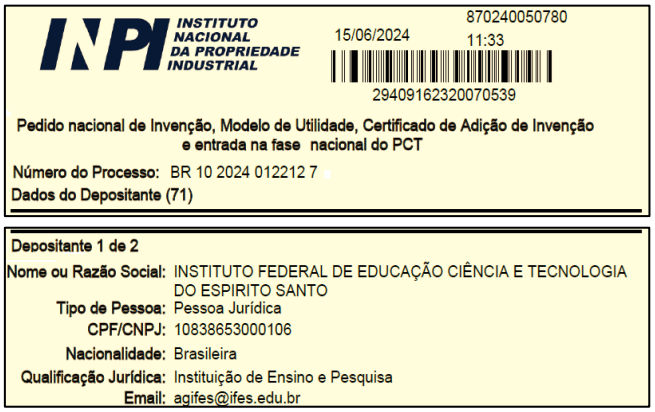
Na figura 7 é possível observar que o lavador cumpriu os primeiros objetivos, realizando a lavagem dos gengibres, sem ocorrer em danos às peças.

4. Conclusão

Após o processo de levantamento e análise dos dados, às proposições de variantes escolhidas trazem um aprimoramento visando economia de recursos, praticidade de manuseio, manutenção facilitada, baixo custo de aquisição e fabricação, sustentabilidade e padronização do processo pós-colheita do cultivo de gengibre. Desta forma, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento da área, mostrando como pode reduzir os custos e melhorar a eficiência desse processo de lavagem, levando em consideração a situação dos médios e pequenos produtores da região. Contribuindo para a qualidade do gengibre após a colheita, se destacando cada vez mais no mercado de exportações. O agora denominado Higienizador, teve seu funcionamento acima das expectativas, tratando-se de uma máquina idealizada e construída em menos de 2 anos de projeto.

5. Patente

Após a construção e a realização dos testes, o lavador foi devidamente registrado no sistema de patentes brasileiro (Figura 8), o Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI), com numeração BR 10 2024 0122127


INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

870240050780
15/06/2024 11:33
29409162320070539

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2024 012212 7
Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2
Nome ou Razão Social: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO ESPIRITO SANTO
Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica
CPF/CNPJ: 10838653000106
Nacionalidade: Brasileira
Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa
Email: agifes@ifes.edu.br

Contribuições dos Autores: Conceitualização, RMGM, SSB; APCGB; SSM,; metodologia, SSM, RMGM; análise formal, RNA; SSM, RMGM; validação RMGM; investigação, LCB; ACGP; SSM, RNA, JLSC; curadoria de dados, SSM, RNA, JLSC; redação – preparação do rascunho original, SSM; redação – revisão e edição, CB; LHV; RMGM; supervisão, RMGM. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa contou com financiamento de bolsas pelo Instituto Federal do Espírito Santo.

Declaração do Comitê de Ética Institucional: Não se aplica.

Declaração de Consentimento Informado: Não se aplica.

Declaração de Disponibilidade de Dados: Os dados coletados, que sustentam os resultados relatados, se encontram em posse dos pesquisadores, não havendo dados arquivados publicamente.

Agradecimentos: Instituto Federal do Espírito Santo e Ifes Campus Itapina.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse..

Referências

1. AHRENS, D. C. NETO F. S.; RIBEIRO, M. de F. S.; COSTA, A;. PEIXOTO, R. T. G.; MILLÉO, R. D. S.; BENASSI, D. A.; CAMPOS, A. C.; GOMES, E. P.; OLIVEIRA, C. F. de. Reflexões sobre a pesquisa participativa. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 2, p.89-92, 2007.
2. ALBIERO, D.; MACIEL, J da S.; MELO, R. P.; MELLO, C. A.; MONTEIRO de L. A. Metodologias de projeto para máquinas agroecológicas: relatos de experiências. Cadernos de Agroecologia. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 6, n. 2. 2011
3. ALMEIDA, L. F. M.; CONFORTO, E. C.; SILVA, S. L.; AMARAL, D. C. Fatores críticos da agilidade no gerenciamento de projetos de desenvolvimento de novos produtos. Produto & Produção, v. 13, n. 1, p.93-113, 2012.
4. ANANDARAJ, M. The Indian Society of Spices and its relevance to spices research and Development. IN: SYMSAC VI: Exploiting Spices Production Potential of the Deccan Region. University of Agricultural Sciences, Dharwad, p.11-13, 2011.
5. CARMO, C.A.S. do; BALBINO, J.M. DE S. Gengibre. Vitória, ES: Incaper, 2015. 192p.
6. CARMO, C.A.S. do; MARIA, E.O.A.; Cap.3 - MANEJO DA CULTURA DO GENGIBRE NA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. Incaper, Vitória, ES, p.47, 2015.
7. CARMO, C.A.S. do; FORNAZIER, M.J.; COSTA, H.; PREZOTTI, L.C.; ABAURRE, M.E.O; BALBINO, J.M. de S.; MARTINS, D.S.; VENTURA, J.A.; MARTINS, A.G. Gengibre (Zingiber officinale Roscoe) In: PAULA Junior, T.J.; VENZON, M. 101 Culturas: Manual de tecnologias agrícolas. 2.ed rev. e atual., Belo Horizonte: EPAMIG, 2019. p.423-432.
8. CORRÊA JUNIOR; MING, L.C.; SCHEFFER, M.C. Cultivo de plantas medicinais, condimentares e aromáticas 2.ed. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 151 p.
9. ELPO, E.R.S. Cadeira produtiva do gengibre (Zingiber officinale Roscoe) no estado do Paraná: análise e recomendações para melhoria da qualidade. Curitiba. 180p. 2004. Tese. Universidade Federal do Paraná. (introdução)
10. ELPO, E.R.S.; NEGRELLE, R.R.B. Zingiber officinale ROSCOE: aspectos botânicos e ecológicos. Visão Acadêmica, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 27-32, Jan.- Jun./2004.

11. GARCIA, R.D.C. Aspectos socioeconômicos da produção de gengibre no estado do Espírito Santo. Gengibre. Carmo, C. A. S. do, Balbino, J. M. de S. Vitória, ES: Incaper, 2015. 192p.
1. GRZEBIELUCKAS, C.; BUSON, M. A.; QUEIROZ, S. G.; ENSSLIN, S.; BALBIM, A. J. Instrumento para identificação das necessidades do consumidor no processo de desenvolvimento do design: Um estudo ilustrado com o projeto de um automóvel. Revista Gestão da Produção, SÃO CARLOS, v.18, n. 2, p.337-350, 2011.
2. JAYASHREE, E. Post harvest processing and scope for mechanization in spices. IN: SYMSAC VI: Exploiting Spices Production Potential of the Deccan Region. Indian Institute of Spices Research, Marikunnu PO, Kozhikode, Kerala, p. 178-187, 2011.
3. KANDA, Gisele Brandão; SOUZA, Rejane de Oliveira; HELD, Maria Sílvia Barros de. Matriz morfológica e biomimética: geração de alternativas em design. Projetica, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 53, 11 jul. 2018.
4. MATOS, F.J.A. Plantas medicinais: guia de seleção e emprego das plantas usadas em fitoterapia no Nordeste do Brasil. 3. ed. Fortaleza : Ed. UFC, 2007. 365 p.
5. MANUEL, L.; CHISSOCA, A.R.C.; AFONSO, A. da C.; ANTÓNIO, A.P. Efeito de gengibre (zingiber officinale) no perfil lipídico e glicêmico em indivíduos com diabetes mellitus tipo 2: Revisão narrativa. RECIMA21 - CiênciasExatas e da Terra, Sociais, da Saúde, Humanas e Engenharia/Tecnologia. v.3, n.6, 2022.
6. MOREIRA, R.M.G.; TEIXEIRA, M.M.; FERNANDES, H.C.; CECON, P.R.; MINETTE, L.J. Desenvolvimento de um revolvedor mecânico de café. Semina: Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, Brasil, v.1, n.34, 2013.
7. MOREIRA, R.M.G.; TEIXEIRA, M.M.; Santos, F.L.; FERNANDES, H.C.; CECON, P.R. Preliminary design of a coffee harvester. Semina: Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina Londrina, Brasil, v.37, n.5, 2016
8. MUNDIM, J. L. C.; SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; NARICI, A. A. F. Simulação do comportamento dinâmico do sistema de vibração de dois sistemas de limpeza. In: Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e à Agroindústria, Porto Seguro, n4, 2003.
9. NEGRELLE, R.R.B.; ELPO, E.R.S.; RÜCKER, N.G.A. Análise prospectiva do agronegócio gengibre no estado do Paraná. Revista Economia e Extensão Rural • Horticultura Brasileira. v.23, n.4, 2005.
10. PADILHA, A. C. M.; CARVALHO, F. F. de; MATTOS, P. de; GOLLO, S. S. A Gestão de design na concepção de novos produtos: Uma ferramenta de integração do processo de gestão e inovação. Revista de Administração da UFSM, SANTA MARIA, v. 3, n. 3, p.346-360, 2010.
11. PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. Projeto na Engenharia – Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produção – Métodos e Aplicações. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 6. ed, 2005. 412p.
12. PEREIRA, R. de C. A; BEZERRA, M.G.A.; RODRIGUES, T.H.S. Cultivo de gengibre em região litorânea do Ceará. Embrapa: Comunicado Técnico, Fortaleza, CE. p.184 2012.
13. ROMANO, L. N. Desenvolvimento de máquinas agrícolas: planejamento, projeto e produção. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2013.
14. SALVADOR, J. W.; SHINOHARA, N. K. S. Otimização do processo de desidratação osmótica do gengibre (Zingiber officinale Roscoe). IX JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO (IX JEPEX) / Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE, 2009.
15. SEVERO, R. F.; ROMANO, L .N.; BENDER, A. R. K.; BOELTER, N. M. Relação entre os fatores de influência no projeto e a estrutura funcional de uma descascadora de mandioca. Ciência Rural, v. 44, n. 9, p.1568-1573, 2014.
16. SOUZA, J.L. de. Cap. 2 - CULTIVO ORGÂNICO DO GENGIBRE. Incaper, Vitória, ES, p.23-46, 2015.
17. STEFANELLO, G.; MACHADO, A. L. T.; REIS, A. V.; MACHADO, R. L. T.; MORAIS, C. S. D. Estrutura funcional de uma semeadora de tração humana. Ciência Rural, v. 44, n. 9, p.1583-1588, 2014.
18. SUMAN, P. A. Processo de Obtenção de Vinagre de Gengibre/ Priscila Aparecida Suman. – Botucatu: [s.n.], 2012. 87 f.

Implementación de un sistema on-the-go para el monitoreo de humedad en suelo desde una plataforma de fenotipado terrestre

Luis Sánchez-Fernández [1,*], Mariana Chiozza [1], Gregorio Egea [1] and Manuel Pérez-Ruiz [1]

[1] Aerospace Engineering and Fluids Mechanics Department, Universidad de Sevilla, Ctra. Utrera km 1, Seville 41013, Spain

* Correspondence: lsanchez1@us.es

Abstract: Precision agriculture depends on high-resolution soil and crop measurements across temporal and spatial scales. This work presents a novel soil moisture measurement system integrated into a phenotyping platform, enhancing crop trait assessment. The system, featuring an onboard soil sensor and linear actuator, offers customizable spatial coverage, georeferenced data acquisition, operational versatility, and seamless integration with other crop sensors. Tested in wheat under two water treatments, the system detected soil moisture differences linked to physiological traits like the stomatal conductance to vapor pressure deficit ratio (Gs/VPD). These measurements enhance understanding of the soil-plant-atmosphere system, essential for precision agriculture implementation.

Keywords: Phenotyping platform; High throughput; soil water content; stomatal conductance

1. Introduction

Decisions in precision agriculture rely on accurate data collection to enable variable rate applications, which maximize return on investment and minimize environmental impact [1]. One key component of precision agriculture applications is the development of high-resolution soil maps and determining soil properties, such as soil volumetric water content (SVW), at a sub-field scale [2]. These soil water estimations can help optimize irrigation strategies and assist the selection of cultivars with contrasting water use patterns in breeding programs.

Ground-based sensing technologies are widely used to achieve precise SVW measurements [3]. These tools provide in-field soil estimations without the need for extensive sample preparation. Common examples include Time Domain Reflectometry (TDR), Capacitance Sensors (CS), Neutron Probes (NP), and Electromagnetic Induction (EMI). Some sensors can be operated manually, providing high-resolution SVW data over small areas. However, scaling these measurements

for large fields is challenging, as manual sampling can be labor-intensive and time-consuming. To address these challenges, on-the-go proximal sensing systems have emerged [4]. Unlike low-resolution remote sensing technologies (e.g. satellites), on-the-go proximal systems involve sensors close to the soil surface, mounted on ground-based vehicles or robotic platforms, to enable real-time monitoring that provides immediate data collection and faster decision-making. These types of on-the-go proximal sensing use electromagnetic induction, light reflection, radar, and microwaves to gather moisture-related data, making them highly valuable in precision agriculture for large-scale monitoring [5]. Although these proximal on-the-go systems solve the problem of large-scale sampling, they usually have low accuracy as they are not ground-based measurement systems [3]. A soil moisture measurement system that can do on-the-go and ground-based measurements will be useful in providing large-scale, accurate, and high-resolution soil information.

A capacitance sensor is currently available for commercial use in an on-the-go ground-based system (i.e., iScan Veris Technology). This system uses a capacitance sensor that samples soil at a 1–3 inches depth, providing continuous soil moisture measurements. However, this system is primarily designed for pre-planting and tillage applications and cannot be used for in-situ measurements during the crop growth cycle. Beyond this limitation, traditional capacitance sensors are sensitive to soil salinity, bulk density, and texture, which can lead to errors if not properly calibrated [6]. They operate at a narrow frequency range in the low MHz range, which makes them more prone to interference from environmental factors. An improved version of capacitance sensors (i.e., HydraProbe®) uses dielectric impedance, which measures the real and imaginary components of the soil's dielectric permittivity [7]. This dual measurement allows variations caused by salinity, temperature, and texture to work well across different soil conditions without requiring constant adjustment. Therefore, HydraProbe®'s measurements are highly reliable, making it suitable for agricultural applications, scientific research, and environmental monitoring.

In this work, we developed a real-time new soil moisture monitoring system for its use with standing crops. This system improves existing solutions by combining HydraProbe® sensor data with the linear actuator’s positional precision, all integrated into a phenotyping platform developed by the research group. Key features include: 1) Customizable Coverage: Users can adjust sampling density by making multiple passes for higher-resolution data; 2) Georeferenced Data: Enables detailed soil moisture mapping and prescription irrigation plans; 3) Versatility: The system can operate during the growing season, unlike traditional systems limited to pre-planting measurements. 4) Integration Capabilities: Data can be combined with other sensors on the platform to assess additional soil properties (e.g., nutrients,

organic matter) or build genotype-specific databases. This system provides an innovative solution for high-resolution soil moisture monitoring while offering opportunities for advanced analysis of crop responses to environmental challenges and the development of irrigation plans. Combining efficiency, real-time feedback, and multi-sensor integration represents a leap forward in precision agriculture.

2. Materials and Methods

3.1. Soil moisture measurement system

Soil moisture data for wheat experimental plots were collected using an onboard soil sensor (HydraProbe®, Stevens Water Monitoring Systems Inc., Portland, OR, USA) integrated into a linear actuator (L14, LINAK actuadores S.L.u, Barcelona, Spain) (Figure 1). The sensor determines the volumetric soil water content based on probe impedance. This impedance is calculated by measuring the signal generated from the voltage applied to the probe's metal rods. The relationship between the probe impedance and soil dielectric permittivity is described by the formulation reported in [8], enabling accurate soil moisture readings with minimal disruption. The sensor features four stainless steel rods, each 0.057 m long and 0.003 m in diameter, extending from a 0.04 m cylindrical head. The rods are arranged where a central rod is surrounded by three others, forming an equilateral triangle with sides measuring 0.022 m. It includes a thermistor in the stainless-steel baseplate between the rods, which measures soil temperature. When the probe is inserted into the soil, the stainless-steel base remains in close contact with the soil, ensuring accurate temperature readings. The sensor provides a temperature measurement accuracy of ±0.3 °C within a range of −30 °C to 60 °C. This design allows reliable soil moisture and temperature measurements without requiring permanent installation, as the probe can be easily inserted and removed as needed.

The soil moisture measurement system uses a robotic arm with the soil sensor, connected via SDI-12 protocol. A linear actuator controlled through an H-bridge circuit powered by a 12V battery inserted the sensor into the soil. The H-bridge allowed direct and reverse linear actuator motion, enabling precise insertion and removal of the sensor without requiring permanent installation. A limit switch detects when the sensor reaches the soil surface, ensuring accurate placement. All operations were controlled by an Arduino microcontroller (Arduino Uno, Ivrea, Italy).

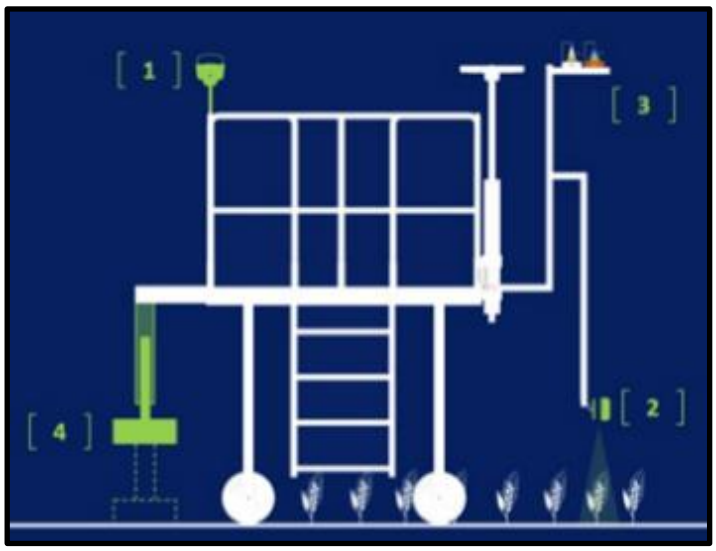


Figure 1. Phenotyping platform diagram equipped with integrated onboard sensors, including a soil moisture monitoring system (4).

3.1. Soil moisture measurement system

A wheat field experiment (Figure 2) was planted at the University of Seville, Spain (37.351174, -5.938766) on February 1st, 2024. The experiment consisted of two different irrigation treatments, creating two distinct environments regarding crop water availability and soil moisture content. Water treatments were:

1. Irrigation (100% ETc) where weekly irrigation was applied with 8 x 8 m sprinkler system to meet the crop water requirements based on the crop coefficient method [9]. Weekly Eto was calculated using Hargreaves & Samani method [10].

2. No irrigation (rainfed conditions).

Each experiment was planted with four cultivars (Don Cristóbal, Don Máximo, Don Ricardo and Calero) and 3 replications (12 plots). The plot size was 8 rows, 1.6 meters in width and 6 meters in length. Barley was planted as a buffer crop between the water treatments.

Accumulated rainfall was 300 mm during the crop cycle. In each plot and experiment, soil volumetric water (SVW), stomatal conductance (Gs) and vapor pressure deficit (VPD) were recorded at three different time points: 1) April 15th, 2024; 2) April 24th, 2024; and 3) May 3rd, 2024. These time points correspond with the heading stage (~58 code in the BBCH phenological scale) and the beginning of flowering (~61-63 BBCH scale). Soil moisture (SVW) was measured using the HydraProbe® sensor mounted on the phenotyping platform with the robotic arm. Gs and VPD were measured in two randomly chosen plants within each plot with a portable gas exchange system (Ciras-3, PP-Systems, Amesbury, MA, U.S.A).

Adjusted stomatal conductance was calculated using the Gs to VPD ratio (Gs/VPD) to account for environmental variations that may impact genotypic differences in Gs. A separate ANOVA was performed for each date to analyze SVW and adjusted Gs, assessing the effects of water treatments, replicates, cultivars, and their interaction (Treatment × Cultivar).

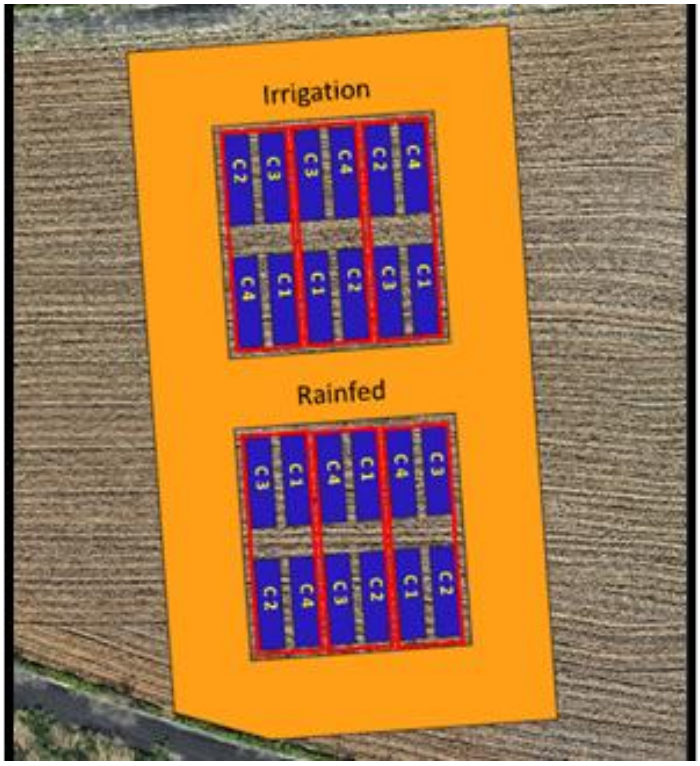


Figure 2. Field experiment layout: Diagram illustrating the experimental plot arrangement, including treatment distribution, replicate structure, and cultivar placement within the field. Blue and red rectangles represent plots with cultivars and blocks, respectively.

3. Results

ANOVA results (Table 1- Appendix) indicated that water treatments significantly affected SVW and adjusted Gs. Soil moisture differences were observed across all three dates, while adjusted Gs differences were significant on the second and third dates. A boxplot comparing SVW and adjusted Gs across treatments for each date visually represents these findings (Figure 3). No significant main effect of cultivar or treatment × cultivar interaction was detected. This figure reveals the connection between soil moisture and adjusted stomatal conductance, following similar trends—except on the first sampling date. This exception could indicate that plants need time to adjust their stomatal response to changes in water availability.

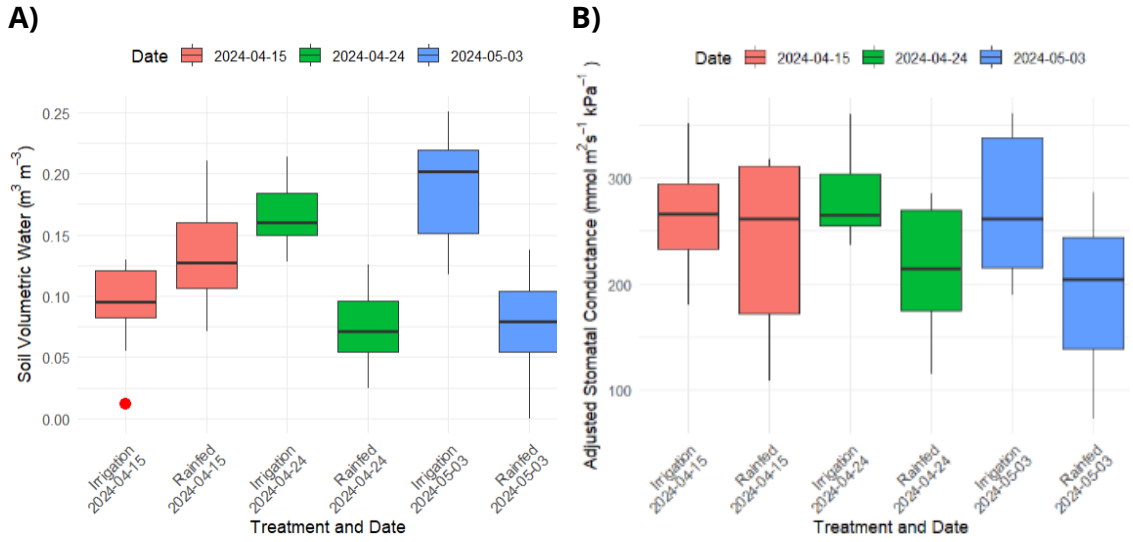


Figure 3. Soil volumetric water (A) and adjusted stomatal conductance (B) were used for the two water treatments and the three sampling dates.

4. Discussion

The implementation of the on-the-go soil moisture monitoring system within the phenotyping platform enabled the detection of significant differences in SVW across water treatments at all three sampling dates. These results confirm the system's ability to provide reliable and spatially resolved measurements under field conditions during the growing season. The use of the HydraProbe® sensor in combination with the robotic actuator allowed accurate, repeatable measurements without requiring permanent installation, which is a key improvement over existing systems limited to pre-planting use.

Adjusted stomatal conductance (Gs/VPD) followed similar trends to SVW on the second and third sampling dates, indicating that differences in soil water content were reflected in physiological crop responses. The absence of significant differences in adjusted Gs on the first sampling date, despite SVW variation, suggests that plants may require time to physiologically adjust to water availability changes. This temporal lag highlights the importance of continuous monitoring for capturing crop responses over time rather than relying on single-date measurements.

No significant effects of cultivar or treatment × cultivar interaction was observed, indicating that the variation in adjusted Gs was primarily driven by water availability rather than genotypic differences under the tested conditions. This suggests that, within the scope of this study, all cultivars responded similarly to the imposed treatments. Nevertheless, the integration of this soil monitoring system with

additional sensors on the platform allows for future exploration of genotype-specific responses in more variable environments or stress scenarios.

The ability to collect georeferenced, real-time soil moisture data during the crop cycle enhances the understanding of soil-plant-atmosphere interactions. These findings demonstrate the potential of the system for supporting high-resolution phenotyping efforts and precision agriculture applications, such as variable rate irrigation and selection of cultivars with contrasting water use efficiency. The integration of accurate, in-situ soil moisture data with physiological measurements provides a valuable tool for improving water management strategies and advancing data-driven crop research.

5. Conclusions

The soil moisture monitoring system developed in this work enables regular measurements of soil moisture and allows for large-scale spatial and temporal monitoring with high precision. Even minor variations in water availability can trigger significant plant responses [11]. Consistent soil moisture monitoring in the topsoil layer is crucial for crop production, as this highly dynamic zone directly influences crop growth. Additionally, since the system is integrated into a phenotyping platform, it has the potential to carry additional sensors to measure other variables related to both soil and crop processes.

The complexity of plant-water interactions can be predicted using simulation models that often require numerous parameters, limiting the practical application of such models. Moreover, many of these parameters are tied to environmental conditions and plant traits that vary significantly across space and time yet are often treated as constants [12]. This variability contributes to the ongoing uncertainty in understanding plant-water relationships across different species, locations, and environmental conditions [13]. Therefore, the fusion of all collected data could facilitate the development of statistical and mechanistic predictive models based on these measurements. Obtaining these parameters in a high-throughput way is essential for a deeper understanding of the soil-plant-atmosphere system within a specific agricultural setting.

Author Contributions: Conceptualization, Luis Sánchez-Fernández, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz; methodology, Luis Sánchez-Fernández, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz; formal analysis, Luis Sánchez-Fernández and Mariana Chiozza; investigation, X.X.; resources, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz; data curation, X.X.; writing—original draft preparation, Luis Sánchez-Fernández and Mariana Chiozza; writing—review and editing, Luis Sánchez-Fernández, Mariana Chiozza, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz; supervision, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz; project administration, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz; funding acquisition, Gregorio Egea and Manuel Pérez-Ruiz. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors acknowledge the Spanish Ministry of Science and Innovation funding through the program "National Plan 2021-2023 - Targeted Research Projects" (project reference PID2021-125080OB-I00) to conduct the experiments.

Data Availability Statement: In this section, please provide details regarding where data supporting reported results can be found, including links to publicly archived datasets analyzed or generated during the study.

Acknowledgments: In this section, you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Conflicts of Interest: Authors declare no conflict of interest.

Appendix A

Table 1. ANOVA results for soil volumetric water and adjusted stomatal conductance.

Soil Volumetric Water				
Date	Term	DF	F-value	P-value
4/15/24	Treatment (T)	1	9.49	**0.01**
4/15/24	Cultivar (C)	3	2.17	0.14
4/15/24	TxRep	2	3.42	0.06
4/15/24	TxC	3	0.38	0.77
4/15/24	Residuals	14		
4/24/24	T	1	87.92	**0.00**
4/24/24	C	3	0.73	0.55
4/24/24	TxRep	2	5.28	0.02
4/24/24	TxC	3	1.74	0.21
4/24/24	Residuals	14		
5/3/24	T	1	37.15	**0.00**
5/3/24	C	3	0.51	0.69
5/3/24	TxRep	2	0.18	0.83
5/3/24	TxC	3	1.34	0.30
5/3/24	Residuals	14		

Adjusted Stomatal Conductance				
4/15/24	T	1	0.84	0.37
4/15/24	C	3	2.24	0.13
4/15/24	TxRep	2	0.66	0.53
4/15/24	TxC	3	0.90	0.47
4/15/24	Residuals	14		
4/24/24	T	1	9.41	**0.01**
4/24/24	C	3	0.48	0.70
4/24/24	TxRep	2	0.15	0.86
4/24/24	TxC	3	0.75	0.54
4/24/24	Residuals	14		
5/3/24	T	1	9.26	**0.01**
5/3/24	C	3	1.31	0.31
5/3/24	TxRep	2	2.17	0.15

5/3/24	TxC	3	0.37	0.78
5/3/24	Residuals	14		

References

References must be numbered in order of appearance in the text (including citations in tables and legends) and listed individually at the end of the manuscript. We recommend preparing the references with a bibliography software package, such as EndNote, ReferenceManager or Zotero to avoid typing mistakes and duplicated references. Include the digital object identifier (DOI) for all references where available.

Citations and references in the Supplementary Materials are permitted provided that they also appear in the reference list here.

In the text, reference numbers should be placed in square brackets [ ] and placed before the punctuation; for example [1], [1–3] or [1,3]. For embedded citations in the text with pagination, use both parentheses and brackets to indicate the reference number and page numbers; for example [5] (p. 10), or [6] (pp. 101–105).

1. Getahun, S., Kefale, H., Gelaye, Y. (2024). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. The Scientific World Journal, (2024-2126734), 1-12.
2. Peng, Y., Yang, Z., Zhang, Z., Huang, J. (2024). A Machine Learning-Based High-Resolution Soil Moisture Mapping and Spatial–Temporal Analysis: The mlhrsm Package. Agronomy (14). Author 1, A.B.; Author 2, C. Title of Unpublished Work. *Abbreviated Journal Name* stage of publication (under review; accepted; in press).
3. Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S.B., Montzka, C., Vereecken, H., Tuller, M. (2019). Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. Rev. Geophys. (57), 530–616.
4. Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. Comput. Electron. Agric. (44), 71–91.
5. Piccini, C., Metzger, K., Debaene, G., Stenberg, B., Götzinger, S., Borůvka, L., Sandén, T., Bragazza, L., Liebisch, F. (2024). In-field soil spectroscopy in Vis–NIR range for fast and reliable soil analysis: A review. Eur. J. Soil Sci. (75), 1–18.
6. Parvin, N., and Degré, A. (2016). Soil-specific calibration of capacitance sensors considering clay content and bulk density. Soil Res. (54), 111–119.
7. Millán, S., Montesinos, C., Campillo, C. (2024). Evaluation of Different Commercial Sensors for the Development of Their Automatic Irrigation System. Sensors (24), 7468.
8. Seyfried, M.S., Grant, L.E., Du, E., Humes, K. (2005). Dielectric Loss and Calibration of the Hydra Probe Soil Water Sensor. Vadose Zo. J. 4, 1070–1079.
9. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
10. Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric. (2), 96-99.
11. Nguyen, T.H., Langensiepen, M., Gaiser, T., Webber, H., Ahrends, H., Hueging, H., Ewert, F. (2022). Responses of winter wheat and maize to varying soil moisture: From leaf to canopy. Agric. For. Meteorol. 314, 108803.
12. Damm, A., Paul-Limoges, E., Haghighi, E., Simmer, C., Morsdorf, F., Schneider, F.D., van der Tol, C., Migliavacca, M., Rascher, U. (2018). Remote sensing of plant-water relations: An overview and future perspectives. J. Plant Physiol. 227, 3-19.
13. Novick, K.A., Ficklin, D.L., Baldocchi, D., Davis, K.J., Ghezzehei, T.A., Konings, A.G., MacBean, N., Raoult, N., Scott, R.L., Shi, Y., Sulman, B.N., Wood, J.D. (2022). Confronting the water potential information gap. Nat. Geosci. 15, 158–164.

Impacto do Míldio na geometria e desenvolvimento da Videira: Monitorização com VANT

Fernando Portela [1,2], Luís Pádua [1,5], Joaquim J. Sousa [4] e Claudio A. Paredes [2,6]*

[1] CITAB- Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;

[2] proMetheus - Unidade de Investigação em Materiais, Energia e Ambiente para a Sustentabilidade, Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal;

[3] Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal;

[4] Centro de Robótica na Indústria e Sistemas Inteligentes (CRIIS), INESC Tecnologia e Ciência (INESC-TEC), 4200-465 Porto, Portugal;

[5] Instituto para a Inovação, Capacitação e Sustentabilidade da Produção Agroalimentar, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal;

[6] CISAS — Centro de Investigação em Sistemas Alimentares e Sustentabilidade, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo.

Resumo: O estudo em questão teve como objetivo principal avaliar o impacto do míldio na geometria e no desenvolvimento da videira, recorrendo à utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) para monitorização remota. A investigação foi realizada numa vinha localizada na região vitivinícola dos Vinhos Verdes, em Portugal, e comparou videiras que receberam tratamento com fungicidas e videiras que não receberam qualquer tipo de tratamento. Foram capturadas e processadas imagens multiespectrais e analisadas variáveis como a área, a altura e o volume da canópia da videira ao longo do ciclo de crescimento. Os resultados obtidos indicaram que o míldio afeta significativamente a estrutura da planta, com redução precoce da área e volume da canópia nas videiras não tratadas, enquanto a altura foi impactada em estágios mais tardios. Diferenças estatisticamente significativas emergiram a partir de julho, período em que a doença se agravou. O recurso a VANTs mostrou-se eficaz na deteção antecipada da infeção e na gestão da vinha, possibilitando intervenções mais precisas. O estudo salienta a importância da monitorização remota na viticultura de precisão, contribuindo para a gestão e a mitigação dos danos causados pelo míldio, reduzindo perdas produtivas e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Deteção Remota, Viticultura de Precisão, Variáveis Morfométricas, Series temporais

1. Introdução

O míldio, tal como outras doenças fúngicas, afetam anualmente e ao longo do ciclo vegetativo a produtividade e a qualidade da uva [1], bem como a fisiologia da planta, o seu estado sanitário e consequentemente o desenvolvimento e crescimento

homogéneo da planta [2,3]. Este impacto na cultura é tanto maior, quanto a intensidade e persistência da doença, originando quebras de rendimento produtivo elevadas que muitas vezes não são devidamente quantificadas.

As análises de quebra de produção, por norma são avaliadas por métodos tradicionais, principalmente através de técnicos especializados, o que muitas vezes pode originar subjetividade e ineficácia na quantificação real de perda produtiva [4], mas também na quantificação da perda de área e volume, derivada das deficiências e anormal estrutura e geometria da videira.

A deteção e análise de sintomas específicos associados a uma doença, como o míldio, apresenta um procedimento desafiador devido à variabilidade nos sintomas observados na videira, em função do estágio de desenvolvimento da doença, bem como ao potencial de outros fatores naturais produzirem sintomas muito semelhantes [5].

A identificação das reais quebras de produtividade e/ou estimativa do rendimento da vinha, estão sujeitas a praticas que requerem a determinação de alguns indicadores de rendimento por videira, definidos pelo número de cachos, bago e peso [6–8]. No entanto, a maioria destes métodos clássicos é destrutiva, árdua, extensiva no tempo e muitas vezes insuficiente para obter dados representativos da produtividade, atendendo à variabilidade inter-anual e espacial, à dimensão da amostra, mas também devido às condições edafo-climáticas e/ou práticas culturais entre outras.

Nesta lógica, a capacidade de realizar estimativas anuais, de forma localizada e espacialmente explicita, para cada parcela de interesse, percebendo localizações e sobrepondo informação geográfica com outras variáveis de zonagem da parcela, como sejam o solo, o clima e as variedades, poderão trazer um novo olhar na forma de percebermos os impactos na videira, atrasos no seu normal crescimento, diminuição da área e volume efetivo de produção em comparação com as perdas de produção originadas por ocorrência de determinadas doenças.

Na atualidade a espacialização de dados e informação de apoio à tomada de decisão, pode ser potenciada, ajustada e apoiada no uso de sensores acoplados a veículos aéreos não tripulados. Estes traduzem uma rapidez de processos, menor subjetividade nas leituras e uma homogeneização dos resultados obtidos.

Na agronomia, nomeadamente na viticultura, este uso tem tido um crescente interesse técnico, desempenhando um papel importante na modernização das práticas agrícolas, permitindo uma gestão mais eficiente na cultura, mitigando esses impactos provocados por doenças [9].

Vários trabalhos, tem sido desenvolvidos com o uso de sensores aéreos e VANT, para a recolha de informação, a vários níveis, como seja: i) identificação do stress hídrico da planta [10]; ii) a deteção do míldio, com imagens térmicas [11], imagens RGB [12], ou através do uso de redes neuronais [13] iii) deteção de outras doenças através de algoritmos automatizados [14,15] seja deep learning [16] ou machine learning [17] entre outros.

Este trabalho pretende avaliar o impacto existente numa parcela de vinha da região dos vinhos verdes, e quantificar a perda de área e volume de produção, provocada pela ocorrência persistente e continua do míldio. Esta avaliação foi desenvolvida a partir de imagens aéreas obtidas a partir de sensores multiespectrais acoplados a VANT, através da monitorização multi-temporal ao longo do ciclo vegetativo ocorrido na parcela em estudo.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo e desenho experimental

O estudo foi conduzido durante o ciclo de desenvolvimento da vinha em 2023, numa área de 2,2 hectares cultivada com Vitis vinifera cv. Loureiro. A vinha encontra-se situada na região demarcada dos Vinhos Verdes, sub-região do Lima no concelho de Ponte de Lima, distrito de Viana do Castelo, no noroeste de Portugal. A vinha em questão, situa-se a uma altitude de 50 metros (Figura 1a). A escolha desta vinha baseou-se no seu histórico de alta incidência de míldio, o que a torna um local propício para estudos integrados da doença. Adicionalmente, a região vitícola dos Vinhos Verdes é caracterizada por elevados índices de precipitação e humidade relativa, fatores que favorecem a proliferação de fungos, destacando a necessidade de estratégias eficazes de monitorização. Dessa forma, a seleção desta área de vinha cumpre com os requisitos necessários para que o estudo seja realizado em condições reais e representativas dos desafios vitícolas em climas húmidos.

O delineado do estudo em dois blocos de 0,14 hectares cada: um bloco submetido a tratamentos fitossanitários normais na região (representado por plantas assinaladas a cinza-claro na Figura 1b) e outro sem qualquer aplicação de tratamentos fitossanitários (representado por plantas assinaladas a vermelho na Figura 1b). Cada bloco é constituído por seis fileiras, sendo que as duas centrais atuam como zona de tampão para minimizar a interferência entre as duas áreas. A amostra do estudo incluiu um total de 84 videiras, distribuídas de forma equitativa entre os blocos, com 42 plantas em cada zona.

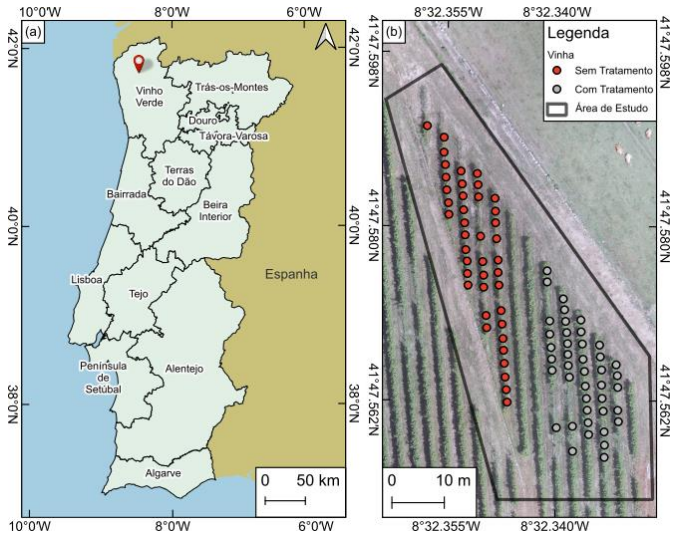


Figura 1. A área de estudo encontra-se localizada em Portugal continental **(a)**. O desenho experimental **(b)** localização das videiras sem tratamento (vermelho) e videiras submetidas a tratamento (cinzento-claro).

2.2. Captura de dados aéreos

A recolha de dados de deteção remota foi efetuada com recurso ao VANT DJI Matrice 210, um VANT multirrotor, capaz de descolar e aterrar na vertical. O controlo do VANT foi realizado através de um ecrã CrystalSky (DJI) utilizado para o planeamento do voo e a gestão da captação de imagens. Durante as campanhas de voo, foi montado uma câmara MicaSense RedEdge-MX, que foi utilizado para a aquisição de dados multiespectrais, captando imagens em cinco bandas: azul (475 nm, largura de banda de 20 nm), verde (560 nm, largura de banda de 20 nm), vermelho (668 nm, largura de banda de 10 nm), RedEdge (717 nm, largura de banda de 10 nm) e infravermelho próximo (NIR) (840 nm, largura de banda de 40 nm). A calibração radiométrica foi realizada antes e após cada voo com o auxílio de um painel de calibração específico para o sensor. As campanhas de voo decorreram durante a estação de desenvolvimento vegetativo da vinha de 2023, ao meio-dia solar (entre as 12:00 e as 13:00), abrangendo 14 missões distintas entre maio e agosto, correspondendo a diferentes fases fenológicas da videira. O VANT operou a uma altitude de 100 metros a partir do ponto de descolagem, com uma sobreposição lateral e longitudinal de 80%, resultando numa resolução espacial das imagens multiespectrais de 0,08 metros. Adicionalmente, foram estabelecidos pontos de controlo no solo (GCPs) na área de estudo, cujas coordenadas foram registadas com recurso ao MobileMapper 50.

2.3. Processamento das imagens

As imagens obtidas pelos VANT foram sujeitas a um processo de tratamento através do software Pix4Dmapper Pro, que recorre a algoritmos de estrutura a partir do

movimento (SfM) para identificar pontos comuns nas imagens. O procedimento inicial de processamento consistiu na calibração dos parâmetros internos e externos da câmara, bem como no cálculo dos pontos de ligação, resultando numa nuvem de pontos de apoio à orientação dos fotogramas. Foi utilizada a metodologia dos GCPs para garantir o alinhamento dos dados nas diferentes campanhas de voo, obtendo-se um erro médio quadrático global (planimétrico e altimétrico) de 0,056 m para as imagens multiespectrais. Posteriormente, foram geradas nuvens de pontos de alta densidade e os pontos foram submetidos a uma classificação. Na fase conclusiva do processo, foram gerados produtos de imagem raster ortorretificados. Adicionalmente, as posições geradas a partir da nuvem densa de pontos foram sujeitas a operações de suavização e filtragem do ruído. Os resultados obtidos incluem os modelos digitais de terreno (DTMs) e os modelos digitais de superfície (DSMs), entre outros.

O processamento do raster e a análise geoespacial foram executados recorrendo ao programa QGIS (versão 3.36.2). O modelo de superfície da cultura (CSM) foi calculado para analisar a altura e a estrutura da canópia da videira, permitindo isolar a videira do solo e de outros elementos que não fossem a vinha. Este raster foi obtido através do cálculo da diferença vertical entre o DSM e o DTM.

O cálculo do CSM permitiu determinar as alturas dos objetos dentro da parcela de vinha, incluindo a canópia da videira, os postes dos bardos da vinha, a vegetação na entrelinha e o solo. Este produto raster foi utilizado para identificar os pixéis com valores correspondentes a uma altura específica, permitindo a criação de máscaras representativas da canópia da videira. Para proceder à isolação da canópia, foi necessário excluir todos os píxeis correspondentes ao solo ou à vegetação presente entre os bardos. Apenas os píxeis com valores de altura superiores a um metro foram selecionados para o primeiro voo (18 de maio de 2023). Para os voos subsequentes, foi aplicado um valor de referência de 1,10 metros, com o objetivo de minimizar os efeitos dos elementos não pertencentes à canópia da videira. As máscaras raster resultantes apresentam um valor de um para a vegetação da videira, enquanto os píxeis não relacionados são definidos como sem dados, o que possibilita o isolamento da canópia.

A aplicação das máscaras teve como objetivo a filtragem de todos os conjuntos de dados raster, através da multiplicação pelos parâmetros de máscara e CSMs, obtendo-se, deste modo, os dados geométricos da canópia. Adicionalmente, foram obtidos dados relativos ao desenvolvimento geométrico da canópia da videira, incluindo a área e o volume. A derradeira fase da extração de dados consistiu na utilização da posição geográfica de 84 videiras, 42 das quais localizadas em cada bloco. A posição geográfica foi obtida a partir do equipamento MobileMapper 50,

que georreferenciou a parte central de cada videira. Estes pontos foram utilizados para criar polígonos retangulares com uma área de 2,5 metros por 2 metros. O valor médio de cada parâmetro geométrico foi extraído para cada polígono da videira e exportado para uma folha de Excel.

2.4. Infeção das videiras e tratamentos fitossanitários

Na zona da vinha onde não foram efetuados tratamentos fitossanitários, a infeção ocorreu de forma natural ao longo das datas de recolha, tendo o impacto da doença se tornado evidente a partir da quarta data, afetando significativamente a canópia das plantas. A ausência de intervenções permitiu a progressão sem controlo do patógeno, refletindo-se na severidade dos sintomas observados, como manchas de óleo, manchas de óleo necróticas, a necrose, a redução da área fotossintética e o comprometimento do desenvolvimento dos cachos nas últimas datas analisadas.

Na zona da vinha saudável, foram realizados tratamentos fitossanitários com o intuito de controlar a doença do míldio, com uma periodicidade de 15 dias, conforme decisão do produtor e em conformidade com a prática comum na região dos Vinhos Verdes. Em determinadas situações, os tratamentos foram antecipados em virtude da previsão de precipitação, uma vez que a chuva constitui um dos principais fatores na propagação da doença. Para o combate ao míldio, foram selecionadas substâncias que reduzem o risco de desenvolvimento de resistências cruzadas, garantindo que cada substância ativa fosse aplicada dentro dos limites regulamentares.

2.5. Análises estatística

Para avaliação da normalidade dos dados, foi realizada uma análise exploratória utilizando o software R, versão 4.5.0. Foram gerados gráficos Q-Q, além do cálculo de estatísticas descritivas das variáveis em análise. Como os dados não seguiam uma distribuição normal, aplicou-se um teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Além disso, analisou-se a dispersão dos dados em relação à média por videira nas zonas tratadas e não tratadas ao longo das campanhas de voo. Para visualizar essa variabilidade, foram elaborados gráficos de caixa de bigodes para cada zona e campanha. No que se refere às variáveis geométricas (área, altura e altura máxima e volume da canópia), os valores médios por tratamento foram calculados e representados graficamente, permitindo a comparação das tendências entre videiras tratadas e não tratadas, num gráfico, com o objetivo de comparar as tendências entre as videiras tratadas e não tratadas.

3. Resultados

A avaliação do impacto da infeção nas variáveis morfométricas da videira foi conduzida em ambas as zonas experimentais, com e sem tratamento fitossanitário, ao longo do período de monitorização. Foi observada uma diferença significativa entre as duas condições, sendo que as videiras não tratadas apresentaram uma área de canópia reduzida, menor altura média e máxima e menor volume em comparação com as tratadas (Figura 2).

Ao longo do tempo, verificou-se uma diminuição progressiva da área da canópia nas videiras não tratadas, tornando-se mais evidente a partir de julho, quando as divergências em relação às videiras tratadas se acentuaram. O volume projetado da canópia seguiu a mesma tendência decrescente nas plantas não tratadas. No entanto, a altura média da videira não apresentou variações significativas até fases mais avançadas da infeção.

Os resultados sugerem que a área e o volume da canópia são indicadores mais sensíveis para avaliar o impacto do míldio, especialmente nas fases iniciais e intermédias da infeção. No geral, as videiras tratadas exibiram canópia mais amplas, maior altura e maior volume em comparação com aquelas que não receberam tratamento, evidenciando que a presença do míldio compromete o desenvolvimento estrutural da planta e restringe seu crescimento potencial.

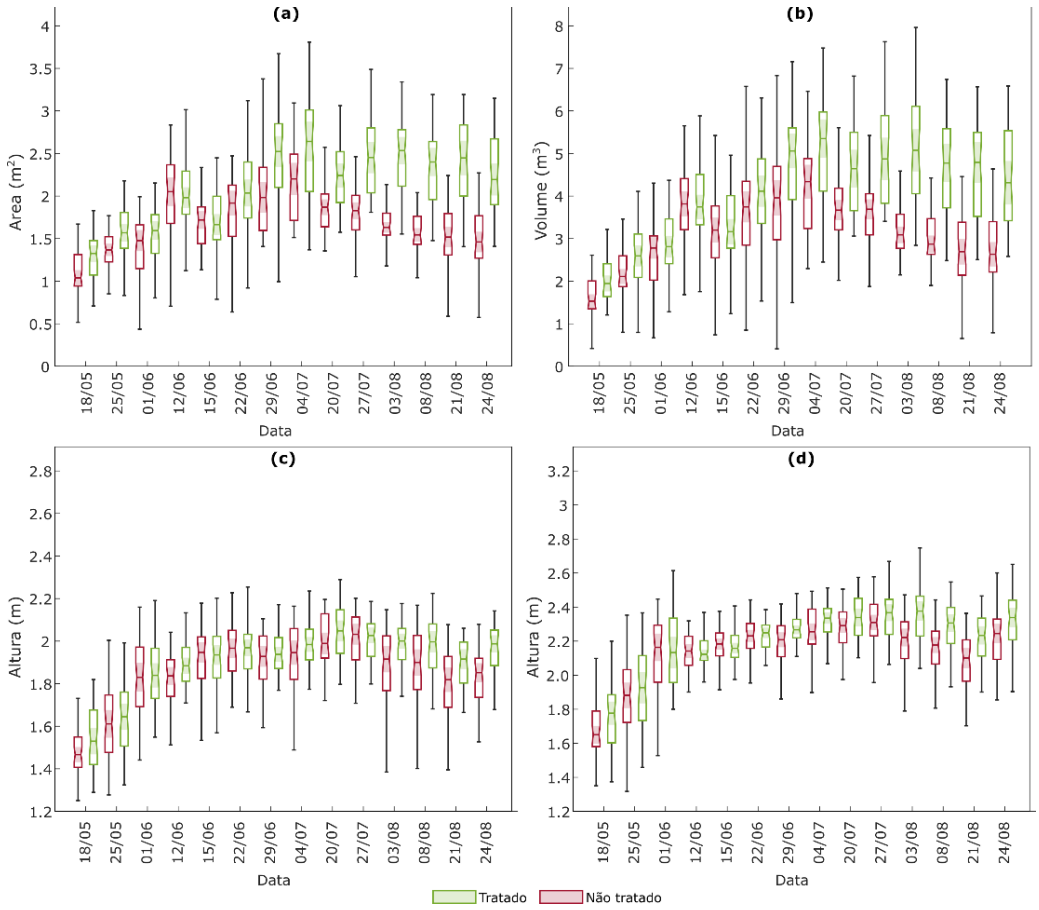


Figura 2. Variáveis morfométricas, **(a)** área da canópia, **(b)** volume projetado, **(c)** altura média e **(d)** altura máxima, das videiras na zona de controlo (zona tratada) e na zona não tratada ao longo dos períodos analisados.

Na área sujeita a tratamentos fitossanitários (Figura 2a), a canópia da videira exibe um crescimento contínuo, atingindo o seu ponto máximo a 4 de julho, ocasião em que a área mediana atinge os 2,6 m^2. O valor máximo registado para a área de canópia das videiras tratadas situa-se nos 3,7 m^2. No dia 29 de junho, a mediana da área de canópia atingiu 2,5 m^2, demonstrando uma estabilização temporária antes do pico. Após este período, a área das videiras tratadas apresenta uma estabilização relativa, enquanto na zona não tratada se observa uma diminuição progressiva. Na área não sujeita a tratamento, a área de canópia da videira é inferior, com a mediana a exceder os 2 m^2 em 12 de junho e 4 de julho, semelhante à área tratada. No entanto, a área máxima registada para as videiras não tratadas não excede os 3,5 m^2 e, após o pico de 4 de julho, observa-se uma redução ao longo das datas de captura de dados.

Em termos de volume projetado (Figura 2b), a tendência de crescimento segue um padrão semelhante ao da área da canópia, com valores mais elevados na zona tratada em comparação com a zona não tratada. O volume mediano das videiras na zona tratada, ultrapassa os 4 m^3 em julho, enquanto as videiras, na zona não tratada

permanecem com valores perto dos 3 m³. O pico do volume máximo nas videiras da zona tratadas aproxima-se dos 8 m³, enquanto na zona não tratada os valores raramente ultrapassam os 6,5 m³.

Relativamente à altura média da videira (Figura 2c), a zona tratada apresenta uma tendência de crescimento consistente, estabilizando em cerca de 2 m a partir de 22 de junho, com o pico do valor mediano a 20 de julho. As plantas mantêm uma altura média superior a 1,8 m durante todo o período analisado. Em contrapartida, as videiras da zona não tratada apresentam alturas mais baixas a partir de 29 de junho, com ligeiras variações, começando com plantas que mal atingem os 2 m. Após 20 de julho, a altura média das videiras da zona não tratadas diminui nas campanhas de voo subsequentes, até valores perto de 1,8 m.

No que diz respeito à altura máxima das videiras (Figura 2d), observa-se uma variação significativa entre as zonas tratada e não tratada. Na zona tratada, a altura máxima das videiras ultrapassa 2,5 m a partir de 4 de julho, atingindo o seu pico por volta de 03 de agosto, quando algumas plantas superam os 2,8 m. Já na zona não tratada, a altura máxima raramente ultrapassa os 2,5 m, evidenciando um crescimento mais contido ao longo do período analisado.

Ao longo da maior parte do período analisado, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre a altura média das videiras não tratadas e tratadas pelo míldio (Tabela 1). No entanto, a partir de 21 de agosto, surge uma diferença significativa ($p < 0,05$), indicando que a doença começa a impactar o crescimento médio das plantas apenas numa fase mais tardia. Esse efeito torna-se ainda mais evidente em 24 de agosto, quando a diferença atinge um nível de significância elevado ($p < 0,001$). Estes resultados sugerem que o míldio afeta inicialmente outras características da planta antes de comprometer a altura média.

Durante os primeiros meses de avaliação, entre 18 de maio e 22 de junho, não se registaram diferenças significativas na altura máxima das plantas. A primeira evidência de impacto surge em 29 de junho e 4 de julho, quando se verificam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), sugerindo um início do efeito do míldio no crescimento vertical. O impacto da doença torna-se mais pronunciado em 3 e 8 de agosto, com diferenças altamente significativas ($p < 0,001$), indicando um comprometimento claro do crescimento das plantas infetadas. Nos dias 21 e 24 de agosto, o efeito continua presente, mas com uma ligeira redução na significância ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), sugerindo que a altura máxima pode estabilizar após um período de forte impacto.

O volume das plantas infetadas foi uma das primeiras métricas a apresentar diferenças estatisticamente significativas em relação às plantas saudáveis, com um impacto já observado em 18 de maio ($p < 0,05$). No entanto, nas semanas seguintes, as diferenças deixam de ser significativas (ns). A partir de 29 de junho, o impacto torna-se extremamente evidente, com diferenças altamente significativas ($p < 0,001$) que persistem até 24 de agosto. Estes resultados indicam que o míldio tem um efeito forte e sustentado na redução do volume das plantas, sendo uma das características mais afetadas pela doença ao longo do tempo.

A área das plantas foi a primeira métrica a mostrar sinais de impacto significativo do míldio, com diferenças altamente significativas em 18 de maio ($p < 0,01$) e 25 de maio ($p < 0,05$). No entanto, nos meses seguintes, essa diferença deixa de ser estatisticamente relevante (ns), sugerindo uma possível variação temporal na resposta das plantas infetadas. A partir de 29 de junho, as diferenças tornam-se novamente significativas ($p < 0,01$) e aumentam de forma contínua, alcançando um nível altamente significativo ($p < 0,001$) que se mantém até 24 de agosto. Isso indica que a doença reduz significativamente a área foliar das plantas, o que pode comprometer processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese e a captação de luz, desde os estágios iniciais da infeção.

Tabela 1. Significância dos valores médios das videiras entre as duas zonas para cada parâmetro. Os níveis de significância são indicados da seguinte forma: ns não significativo, *= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$; e ***= $p < 0,001$.

	18/05	25/05	01/06	12/06	15/06	22/06	29/06	04/07	20/07	27/07	03/08	08/08	21/08	24/08
Altura Média	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***
Altura Máxima	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	***	***	**	*
Volume	*	ns	ns	ns	ns	ns	***	***	***	***	***	***	***	***
Área	**	*	ns	ns	ns	ns	**	**	***	***	***	***	***	***

4. Discussão

Os dados obtidos por VANT permitiram evidenciar o impacto adverso da infeção por míldio no crescimento das videiras, destacando alterações significativas em parâmetros estruturais e fisiológicos das plantas. A comparação entre videiras submetidas a tratamento fitossanitário (zona tratada) e videiras não submetidas a tratamento (zona não tratada), revelou um declínio acentuado em várias métricas ao longo do ciclo vegetativo, sugerindo que a doença compromete progressivamente a vitalidade das plantas.

Este efeito torna-se particularmente preocupante no contexto das doenças fúngicas como o míldio, uma vez que a capacidade de deteção precoce e a adoção de medidas preventivas são fundamentais para uma gestão eficaz da cultura [18]. A monitorização ao longo do ciclo fenológico [19] permite uma análise mais dinâmica da evolução da infeção, contrastando com abordagens pontuais que podem subestimar o impacto real da doença [20]. Neste sentido, a utilização de séries temporais para acompanhar a progressão do míldio representa uma ferramenta valiosa na viticultura de precisão [21], permitindo otimizar a aplicação de tratamentos e reduzir o uso excessivo de produtos químicos.

As videiras não tratadas apresentaram um declínio evidente na área e no volume da canópia, sugerindo que a infeção restringe o crescimento tanto lateral quanto vertical da planta. Embora fatores como práticas de poda e variabilidade genética possam influenciar o desenvolvimento da vegetação, a diferença significativa entre os grupos analisados indica que o míldio acelera a deterioração da canópia, interferindo diretamente na capacidade da planta de manter um crescimento sustentado. Por outro lado, nas videiras tratadas, a redução do vigor ocorreu de forma mais gradual, sendo predominantemente associada ao processo natural de maturação dos frutos e à entrada em senescência.

No que diz respeito à altura das videiras, os impactos iniciais da infeção mostraram-se menos evidentes em comparação com a redução da canópia. Nos estágios iniciais do ciclo, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. No entanto, a partir da segunda metade da estação de crescimento, verificou-se um declínio pronunciado na altura das videiras não tratadas, sugerindo que, em fases mais avançadas da infeção, a planta perde a capacidade de compensação estrutural. Este impacto intensificou-se progressivamente, atingindo significância estatística elevada no final do verão, o que indica que a doença afeta de forma acumulativa o crescimento vertical das videiras.

Entre os parâmetros analisados, o volume da canópia foi um dos primeiros a revelar alterações significativas. Desde os estágios iniciais do ciclo vegetativo, observou-se uma tendência decrescente no volume das videiras infetadas, acompanhada por oscilações que podem refletir respostas fisiológicas da planta à infeção. Em fases mais avançadas, a redução do volume tornou-se estatisticamente significativa e manteve-se ao longo do tempo, confirmando que o míldio exerce um efeito duradouro sobre a estrutura vegetativa.

A área da canópia seguiu um padrão semelhante, sendo um dos indicadores mais sensíveis ao impacto da doença. Registaram-se reduções progressivas ao longo do ciclo, com momentos de estabilização que podem estar associados a mecanismos

compensatórios da planta, como novos lançamentos de pâmpanos (netas). Contudo, nos estágios finais, a diminuição contínua da área foliar comprometeu funções fisiológicas essenciais, como a fotossíntese e a capacidade de captação de luz, agravando a severidade da infeção e limitando o potencial produtivo das videiras.

De forma geral, os resultados deste estudo confirmam que a infeção por míldio afeta de maneira progressiva a estrutura e o desenvolvimento das videiras e que pode ser detetado com recurso a VANTs. A redução da canópia manifesta-se precocemente, enquanto os efeitos na altura tornam-se mais evidentes em fases avançadas. Estes achados reforçam a importância da monitorização contínua da cultura e da implementação de estratégias preventivas, contribuindo para uma gestão mais eficiente das vinhas e para a mitigação dos impactos negativos da doença [20].

5. Conclusões

O presente estudo confirma que a infeção por míldio tem um impacto significativo no crescimento e desenvolvimento das videiras, sendo os efeitos mais evidentes na redução da área e do volume da canópia. A análise comparativa entre plantas tratadas e não tratadas demonstrou que a doença compromete a estrutura vegetativa da videira, afetando a sua capacidade fotossintética e, consequentemente, o seu vigor. Além disso, verificou-se que a altura das videiras constitui um indicador tardio do impacto da infeção, sugerindo que o míldio inicialmente limita a expansão lateral da canópia antes de afetar o crescimento vertical da planta.

Estes resultados sublinham a importância da monitorização precoce e da aplicação estratégica de tratamentos fitossanitários para mitigar os danos causados pelo míldio. A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) revelou-se uma ferramenta eficaz na deteção e acompanhamento da progressão da doença, permitindo uma abordagem mais precisa e eficiente na viticultura de precisão. Assim, este estudo contribui para a otimização das práticas de gestão da videira, reduzindo perdas produtivas e aumentando a eficácia no controlo fitossanitário.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a integração de dados de sensores complementares, como sensores térmicos e multiespectrais, bem como a análise de índices de vegetação e as bandas espectrais associado aos dados geométricos da videira. Além disso, a aplicação de sensores hiperespectrais de proximidade ou aerotransportados poderão fornecer informações adicionais sobre o estado

fisiológico das plantas, melhorando a capacidade de deteção precoce de infeções e permitindo intervenções ainda mais direcionadas e eficazes.

Contributos dos Autores: Conceptualização, F.P., L.P., J.J.S. e C.A-P.; metodologia, F.P., L.P. e C.A-P.; software, F.P.; validação, F.P., J.J.S., C.A-P. e L.P.; análise formal, F.P.; investigação, F.P.; recursos, L.P., C.A-P.; curadoria de dados, F.P.; redação—preparação do rascunho original, F.P.; redação—revisão e edição, J.J.S., C.A-P. e L.P.; visualização, F.P., C.A-P. e L.P.; supervisão, J.J.S., C.A-P. e L.P.; gestão do projeto, C.A-P. e L.P.; obtenção de financiamento, C.A-P. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta investigação foi financiada através de fundos provenientes da proMetheus—Research Unit on Energy, Materials and Environment for Sustainability (https://doi.org/10.54499/UIDP/05975/2020.

Declaração de Disponibilidade dos Dados: Os dados que sustentam este estudo estão disponíveis mediante pedido razoável ao autor correspondente.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer o apoio institucional fornecido pela Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, pela cedência do acesso à vinha experimental que permitiu a realização deste estudo. Este trabalho foi também apoiado por UIDB/05937/2020 Center for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS) (https://doi.org/10.54499/UIDB/05937/2020), através de fundos nacionais provenientes de FCT – Portuguese Foundation for Science and Technology e UID/DB/04033/2020 Centre for the Research and Technology of Agro-Environmental and Biological Sciences (https://doi.org/10.54499/UIDB/04033/2020) , LA/P/0126/2020 Institute for Innovation, Capacity Building and Sustainability of Agri-Food Production (https://doi.org/10.54499/LA/P/0126/2020).

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não existir conflitos de interesse. As entidades financiadoras não tiveram qualquer intervenção no desenho do estudo; na recolha, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, nem na decisão de publicar os resultados.

References

1. Buonassisi, D.; Colombo, M.; Migliaro, D.; Dolzani, C.; Peressotti, E.; Mizzotti, C.; Velasco, R.; Masiero, S.; Perazzolli, M.; Vezzulli, S. Breeding for Grapevine Downy Mildew Resistance: A Review of "Omics" Approaches. *Euphytica* **2017**, *213*, 103, doi:10.1007/s10681-017-1882-8.
2. Goszczynski, D.E.; Habili, N. Grapevine Virus A Variants of Group II Associated with Shiraz Disease in South Africa Are Present in Plants Affected by Australian Shiraz Disease, and Have Also Been Detected in the USA. *Plant Pathology* **2012**, *61*, 205–214, doi:10.1111/j.1365-3059.2011.02499.x.
3. Naidu, R.; Rowhani, A.; Fuchs, M.; Golino, D.; Martelli, G.P. Grapevine Leafroll: A Complex Viral Disease Affecting a High-Value Fruit Crop. *Plant Disease* **2014**, *98*, 1172–1185, doi:10.1094/PDIS-08-13-0880-FE.
4. Hernández, I.; Silva, R.; Melo-Pinto, P.; Gutiérrez, S.; Tardaguila, J. Early Detection of Downy Mildew in Vineyards Using Deep Neural Networks for Semantic Segmentation. *Biosystems Engineering* **2025**, *252*, 15–31, doi:10.1016/j.biosystemseng.2025.02.007.
5. Seng, K.P.; Ang, L.-M.; Schmidtke, L.M.; Rogiers, S.Y. Computer Vision and Machine Learning for Viticulture Technology. *IEEE Access* **2018**, *6*, 67494–67510, doi:10.1109/ACCESS.2018.2875862.
6. Sabbatini, P.; Dami, I.; Howell, G.S. Introduction: Crop Estimation and Vine Growth.
7. Anderson, M.M.; Smith, R.J.; Williams, M.A.; Wolpert, J.A. Viticultural Evaluation of French and California Chardonnay Clones Grown for Production of Sparkling Wine. *Am J Enol Vitic.* **2008**, *59*, 73–77, doi:10.5344/ajev.2008.59.1.73.
8. Fuente, M. de la; Linares, R.; Baeza, P.; Miranda, C.; Lissarrague, J.R. Comparison of Different Methods of Grapevine Yield Prediction in the Time Window between Fruitset and Veraison. *OENO One* **2015**, *49*, 27–35, doi:10.20870/oeno-one.2015.49.1.96.
9. Singh, V.; Sharma, N.; Singh, S. A Review of Imaging Techniques for Plant Disease Detection. *Artificial Intelligence in Agriculture* **2020**, *4*, 229–242, doi:10.1016/j.aiia.2020.10.002.
10. Araújo-Paredes, C.; Portela, F.; Mendes, S.; Valín, M.I. Using Aerial Thermal Imagery to Evaluate Water Status in Vitis Vinifera Cv. Loureiro. *Sensors* **2022**, *22*, 8056, doi:10.3390/s22208056.
11. Portela, F.; Paredes, C.A.; Sousa, J.J.; Pádua, L. The Potential of Thermal Imaging to Assist Winemakers in the Detection of Downy Mildew in Vitis Vinifera Cv Loureiro. *Procedia Computer Science* **2025**, *256*, 78–85, doi:10.1016/j.procs.2025.02.098.

12. Kerkech, M.; Hafiane, A.; Canals, R. Vine Disease Detection in UAV Multispectral Images Using Optimized Image Registration and Deep Learning Segmentation Approach. *Computers and Electronics in Agriculture* **2020**, *174*, 105446, doi:10.1016/j.compag.2020.105446.
13. Kuznetsov, P.N.; Kotelnikov, D.Y.; Shchekin, V.Y.; Koltsov, A.D.; Kabankova, E.N. Intelligent Complex of Monitoring and Diagnostics of Grape Plantations. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **2022**, *981*, 032020, doi:10.1088/1755-1315/981/3/032020.
14. Balaceanu, C.; Streche, R.; Roscaneanu, R.; Osiac, F.; Orza, O.; Bosoc, S.; Suciu, G. Diseases Detection System Based on Machine Learning Algorithms and Internet of Things Technology Used in Viticulture. In Proceedings of the 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB); IEEE: Iasi, Romania, November 17 2022; pp. 1–4.
15. Beia Consult International, Bucharest, Romania, RD Department; Roșcăneanu, R.; Streche, R.; Beia Consult International, Bucharest, Romania, RD Department; Osiac, F.; Beia Consult International, Bucharest, Romania, RD Department; Bălăceanu, C.; Beia Consult International, Bucharest, Romania, RD Department Detection of Vineyard Diseases Using the Internet of Things Technology and Machine Learning Algorithms.; March 18 2022; pp. 128–139.
16. Ouhami, M.; Es-saady, Y.; Hajj, M.E.; Canals, R.; Hafiane, A. Meteorological Data and UAV Images for the Detection and Identification of Grapevine Disease Using Deep Learning. In Proceedings of the 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB); November 2022; pp. 1–4.
17. Patil, S.S.; Thorat, S.A. Early Detection of Grapes Diseases Using Machine Learning and IoT. In Proceedings of the 2016 Second International Conference on Cognitive Computing and Information Processing (CCIP); August 2016; pp. 1–5.
18. Clippinger, J.I.; Dobry, E.P.; Laffan, I.; Zorbas, N.; Hed, B.; Campbell, M.A. Traditional and Emerging Approaches for Disease Management of Plasmopara Viticola, Causal Agent of Downy Mildew of Grape. *Agriculture* **2024**, *14*, 406, doi:10.3390/agriculture14030406.
19. Pádua, L.; Marques, P.; Adão, T.; Guimarães, N.; Sousa, A.; Peres, E.; Sousa, J.J. Vineyard Variability Analysis through UAV-Based Vigour Maps to Assess Climate Change Impacts. *Agronomy* **2019**, *9*, 581, doi:10.3390/agronomy9100581.
20. Portela, F.; Sousa, J.J.; Araújo-Paredes, C.; Peres, E.; Morais, R.; Pádua, L. A Systematic Review on the Advancements in Remote Sensing and Proximity Tools for Grapevine Disease Detection. *Sensors* **2024**, *24*, 8172, doi:10.3390/s24248172.
21. Franke, J.; Menz, G. Multi-Temporal Wheat Disease Detection by Multi-Spectral Remote Sensing. *Precision Agric* **2007**, *8*, 161–172, doi:10.1007/s11119-007-9036-y.

CÁLCULO DE SPEI USANDO LAS BASES DE DATOS CHIRPS Y DAYMET EN EL ESTADO DE MÉXICO

Mauricio Carrillo-Carrillo [1,*], Laura Ibáñez-Castillo [2], Ramón Arteaga-Ramírez [2], and Gustavo Arévalo-Galarza[3]

1 Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Dirección oficial: Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230

2 Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Dirección oficial: Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230

3 Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Dirección oficial: Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230

* Correspondencia: al21130359@chapingo.mx

Abstract: The study analyzes the evolution of droughts in the State of Mexico between 1981 and 2023 using the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI). Using satellite data from CHIRPS (precipitation) and DAYMET (temperature), climate trends were identified using the Mann-Kendall test. The results indicate that precipitation has remained stable, but temperatures have increased significantly, increasing evapotranspiration and exacerbating agricultural droughts. In the last 10 years, droughts have been more frequent and severe, especially in the western part of the state. The analysis showed a decrease in extreme wetness events and an increase in drought duration since 2018. A loss of water resilience was observed, with fewer wet periods and a greater impact on agriculture and water security. To mitigate these effects, efficient water use, implementation of drought-resistant crops, and continuous monitoring are recommended. This study emphasizes the need for climate change adaptation strategies and more effective water management policies to address water challenges in the region.

Key words: Drought indices, SPEI, CHIRPS, DAYMET

1. Introducción

Las sequías agrícolas, que ocurren cuando la disponibilidad de agua en el suelo es insuficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos, representan una grave amenaza para la seguridad alimentaria y la productividad agrícola, especialmente en regiones áridas y semiáridas como el Estado de México [1]. La frecuencia e intensidad de estas sequías han aumentado debido al cambio climático, que ha intensificado la variabilidad de las precipitaciones y aumentado la temperatura, lo que acelera la evapotranspiración y disminuye la humedad del suelo [2]. El impacto de las sequías agrícolas depende de factores como la duración, la intensidad del déficit hídrico y la capacidad del suelo para retener agua [3]. Para evaluar la

severidad y frecuencia de estos eventos, se utilizan índices como el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), que integra la precipitación y la temperatura, proporcionando una visión más precisa del balance hídrico [4]. Los avances en teledetección, como los datos satelitales de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) y DAYMET (Daily Surface Weather Data), han mejorado la monitorización de las sequías, especialmente en áreas con redes de observación limitadas [5].

El Estado de México enfrenta importantes retos en materia de recursos hídricos debido al crecimiento de la población, el uso ineficiente del agua y el envejecimiento de las infraestructuras. Estos problemas se ven agravados por el cambio climático, que ha provocado una reducción de las precipitaciones y sequías recurrentes en los últimos años [6]. La combinación de zonas urbanas y rurales en la región genera una dependencia tanto de acuíferos locales como de fuentes de agua externas, aumentando la vulnerabilidad ante periodos de sequía [7].

En este estudio, se utiliza el SPEI a escalas de 3 y 6 meses para analizar la evolución de las sequías agrícolas en el Estado de México entre 1981 y 2023. A partir de datos satelitales de CHIRPS (precipitación) y DAYMET (temperatura) y aplicando la prueba de Mann-Kendall, se identifican tendencias en las variables climáticas y se determinan los periodos de sequía más críticos. Esto permitirá comprender mejor la vulnerabilidad agrícola en la región y contribuir al diseño de estrategias de adaptación ante el cambio climático.

2. Materiales y Métodos

2.1 Descripción del área de estudio

El Estado de México tiene una superficie de 22,351.8 km^2, lo que representa el 1.1% de la superficie de México; sin embargo, es el Estado más poblado con 16,992,418 habitantes [8], (Figura 1). La zona de estudio se ubica entre los 2,250 y 2,750 msnm, el clima predominante es templado seco, con una temperatura media anual de 15.9 °C y una precipitación media anual de 686 mm con un clima conocido como templado subhúmedo [9].

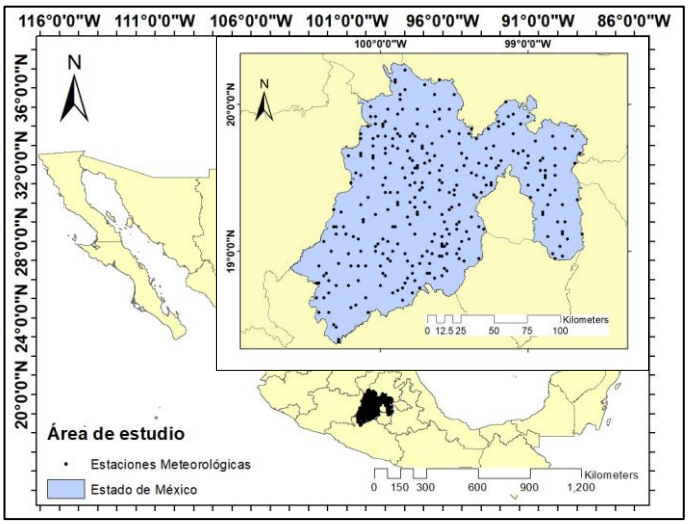


Figura 1. Ubicación del Estado de México y las 313 estaciones meteorológicas operadas por el SMN.

2.2 Bases de datos climatológicas

El análisis de 313 estaciones meteorológicas (Figura 1), en el Estado de México durante un periodo de 42 años (1981-2023) proporciona un sólido conjunto de datos para evaluar las tendencias climáticas regionales y su impacto en la sequía agrícola. Sin embargo, la operatividad continua de solo el 59% de estas estaciones evidencia los desafíos en el mantenimiento de redes de observación a largo plazo. Para complementar y garantizar la cobertura de datos, se integraron registros de las bases satelitales CHIRPS y DAYMET a través de la plataforma Climate Engine (http://ClimateEngine.org).

Se seleccionó la base de datos CHIRPS debido a su capacidad para proporcionar información de precipitación en resoluciones diaria, pentadía y mensual, lo que permite un análisis detallado de la disponibilidad hídrica en distintas escalas temporales. De manera complementaria, la base de datos DAYMET aportó registros diarios y mensuales de temperatura máxima y mínima, lo que mejora la estimación de la evapotranspiración y el balance hídrico.

Para validar la precisión de estos conjuntos de datos, se realizó una comparación con observaciones in situ de la estación meteorológica 15170 en Chapingo. Los coeficientes de determinación obtenidos fueron 0.8921 para precipitación, 0.9974 para temperatura máxima y 0.9824 para temperatura mínima, lo que confirma una fuerte correlación entre los datos satelitales y las mediciones terrestres. Estos valores altos de R^2 indican la confiabilidad de CHIRPS y DAYMET para su uso en el análisis de sequías mediante el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) en el Estado de México.

2.3 Prueba Estadística de Mann-Kendall

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, desviación estándar y coeficientes de correlación en serie, pueden verse afectadas por tendencias a largo plazo o cambios abruptos en la media y la varianza. Estas tendencias en las variables climáticas pueden ser impulsadas por factores antropogénicos, como la deforestación, expansión agrícola, modificaciones en el cauce de ríos, construcción de embalses y reforestación, así como por fenómenos naturales abruptos, incluyendo incendios forestales, terremotos, deslizamientos de tierra y erupciones volcánicas.

Para detectar y analizar estas tendencias en series de datos climáticos, se aplicó la prueba de Mann-Kendall, un método no paramétrico ampliamente recomendado para evaluar tendencias en datos ambientales y climatológicos [10]. Esta prueba permite determinar si existe una tendencia significativa en una serie temporal sin requerir que los datos sigan una distribución normal, lo que la hace adecuada para análisis hidrológicos y climáticos [11, 12].

El procedimiento de la prueba consiste en comparar cada valor dentro de la serie temporal con los valores subsecuentes, evaluando la existencia de una tendencia ascendente o descendente en la variable analizada. En este estudio, la prueba de Mann-Kendall se aplicó a las series de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima obtenidas de CHIRPS y DAYMET para el período 1981-2023, con el objetivo de identificar cambios en el clima que puedan estar afectando la ocurrencia y severidad de las sequías agrícolas en el Estado de México.

2.4 Climate Engine

Climate Engine (https://app.climateengine.org) es una plataforma que permite a usuarios no comerciales acceder y analizar datos climáticos mediante almacenamiento en la nube y procesamiento avanzado de información de observación terrestre. Su capacidad para visualizar cambios climáticos a lo largo de décadas y realizar análisis cuantitativos en cuestión de segundos lo convierte en una herramienta clave para la investigación en ciencias de la Tierra.

Esta plataforma fue desarrollada con el apoyo de la Iniciativa de Datos Climáticos de la Casa Blanca y el premio Google Faculty Research, consolidándose como un recurso fundamental para la toma de decisiones en organismos gubernamentales y científicos a nivel mundial. Su uso permite integrar datos de múltiples fuentes, como imágenes satelitales y modelos climáticos, mejorando la precisión en la detección de tendencias hidrometeorológicas y facilitando el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático [13, 14, 15].

2.5 CHIRPS datos de satélite

El algoritmo CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) se basa en la integración de múltiples fuentes de datos para ofrecer estimaciones precisas de precipitación a escala global. Combina información satelital y mediciones terrestres, mejorando la resolución espacial y temporal, especialmente en regiones con redes de observación limitadas. Las principales fuentes de datos de CHIRPS son: la Climatología de Precipitaciones del Grupo de Riesgos Climáticos (CHPclim), que proporciona datos de precipitación con una resolución de 0.05° de latitud/longitud y utiliza una combinación de datos de estaciones meteorológicas, observaciones satelitales promediadas, elevación, latitud y longitud para generar estimaciones mensuales [16].

Las Estimaciones Satelitales de Precipitación Infrarroja Térmica (IRP), que derivan estimaciones de precipitación a partir de imágenes satelitales en el espectro infrarrojo térmico, mejorando la detección de eventos extremos; y las mediciones pluviométricas in situ, que incorporan datos de pluviómetros terrestres para mejorar la precisión de las estimaciones, particularmente en áreas con cobertura de estaciones meteorológicas. CHIRPS opera en dos escalas temporales clave: pentadía (5 días) y mensual, siendo los datos preliminares disponibles cinco días después del final de cada pentada y la versión final publicada en la tercera semana del mes siguiente [17].

2.6 DAYMET datos de satélite

El conjunto de datos DAYMET proporciona estimaciones de variables meteorológicas y climáticas diarias mediante interpolación y extrapolación estadística de observaciones terrestres. Su alta resolución espacial (1 km) lo hace especialmente útil para el análisis de tendencias climáticas en regiones con redes meteorológicas limitadas.

Las principales variables meteorológicas generadas por DAYMET incluyen:

- Temperatura máxima y mínima diaria
- Precipitación
- Presión de vapor
- Radiación de onda corta
- Equivalente en agua de nieve
- Duración del día

En zonas con información terrestre limitada o inexistente, DAYMET combina interpolación y extrapolación para mejorar la precisión de las estimaciones. Este proceso integra datos de múltiples estaciones instrumentadas, asignando pesos a

cada una en función de relaciones espaciales y temporales con el punto de estimación.

Para optimizar la confiabilidad de los datos en regiones con baja densidad de estaciones, DAYMET ajusta su algoritmo definiendo un radio de búsqueda específico en cada punto de estimación, asegurando que incluya un número representativo de estaciones cercanas.

Genera sus datos a través de dos procesos principales:

1. Variables diarias de temperatura: se derivan de observaciones terrestres preprocesadas y listas de estaciones previamente calculadas.
2. Precipitación diaria: se estima mediante interpolación ponderada, combinando datos preprocesados de estaciones cercanas.

Este enfoque garantiza que los datos de temperatura y precipitación sean confiables, incluso en áreas con escasa cobertura de estaciones meteorológicas [18].

2.7 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

El SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) es un índice ampliamente utilizado para el análisis de sequías, ya que combina la precipitación y la evapotranspiración potencial (ET_0) en un balance hídrico mensual ($D_i = P_i - ET_0$, donde P_i es la precipitación y ET_0 la evapotranspiración). Esto permite una evaluación más precisa de las condiciones hídricas, superando las limitaciones de índices basados únicamente en precipitación, como el SPI (Standardized Precipitation Index) [3].

2.7.1 Cálculo y Escalas Temporales

El SPEI se calcula agregando el balance hídrico mensual en diferentes escalas de tiempo (k), lo que permite evaluar impactos a corto, mediano y largo plazo. Por ejemplo, el SPEI-6 (seis meses) se obtiene sumando los valores D_i de los cinco meses anteriores más el mes actual, lo que refleja tendencias hidrológicas más prolongadas [19].

2.7.2 Estimación de Evapotranspiración (ET_0)

El cálculo de ET_0 es un factor crítico en la estimación del SPEI, y su método de cálculo puede influir en los resultados:

- Thornthwaite: basado solo en la temperatura media diaria y latitud. Útil en regiones con datos limitados, pero menos preciso en climas áridos.

- Hargreaves: método más preciso que Thornthwaite, especialmente en regiones semiáridas, y adecuado cuando no se dispone de datos completos de humedad, viento y radiación.
- Penman-Monteith (FAO-56): método más robusto, recomendado cuando hay datos disponibles de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar.

Dado que las diferencias en los valores de SPEI pueden ser significativas según el método de ET_0 utilizado, se optó por Hargreaves en este estudio, debido a su simplicidad y precisión aceptable en regiones semiáridas como el Estado de México [20].

2.7.3 Implementación en el Estudio

Para este análisis, se utilizó RStudio® con el paquete SPEI.R (versión 1.8.1), desarrollado por Beguería y Vicente-Serrano [21]. Los valores de SPEI se calcularon en escalas de 3 y 6 meses, utilizando como datos de entrada la precipitación mensual (CHIRPS), la temperatura mínima y máxima mensual (DAYMET) y la latitud de los puntos del estudio. Los resultados se categorizaron según la clasificación estándar de SPEI (ver Tabla 1), lo que permitió identificar periodos de sequías moderadas, severas y extremas, así como su duración e intensidad. Este enfoque facilita una mejor comprensión de la evolución de las sequías en la región y contribuye al desarrollo de estrategias para mitigar sus impactos en la agricultura.

Tabla 1. Categorías y clasificación SPEI [22].

Valor del índice	Categoría
> 2.00	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Casi normal
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
-1.50 a -1.99	Muy seco
< -2.00	Extremadamente seco

3. Resultados

El análisis de tendencias climáticas en el Estado de México entre 1981 y 2023 (Figura 2), mostró que la precipitación se mantuvo estable, con un 71.13% de los datos indicando una tendencia creciente no significativa. En cambio, las temperaturas máximas y mínimas presentaron aumentos significativos, con el 87.93% y el 67.98% de las estaciones mostrando tendencias crecientes respectivamente, lo que refleja un claro calentamiento en la región.

Los resultados revelan tendencias de calentamiento más pronunciadas en las temperaturas máximas y mínimas, mientras que la precipitación no muestra variaciones significativas. Esto refuerza la hipótesis de un aumento en la evaporación y el estrés hídrico, lo que puede intensificar la frecuencia y severidad de las sequías agrícolas en la región. El cambio en la media de la temperatura sugiere posibles impactos de factores naturales (El Niño, La Niña) y antropogénicos (urbanización, emisiones de gases de efecto invernadero), lo que resalta la necesidad de estrategias de adaptación para la agricultura y la gestión del agua.

Este análisis permite comprender la evolución climática en el Estado de México y su impacto en la disponibilidad de agua para la agricultura, reforzando la importancia de utilizar índices como el SPEI para evaluar la severidad y duración de las sequías.

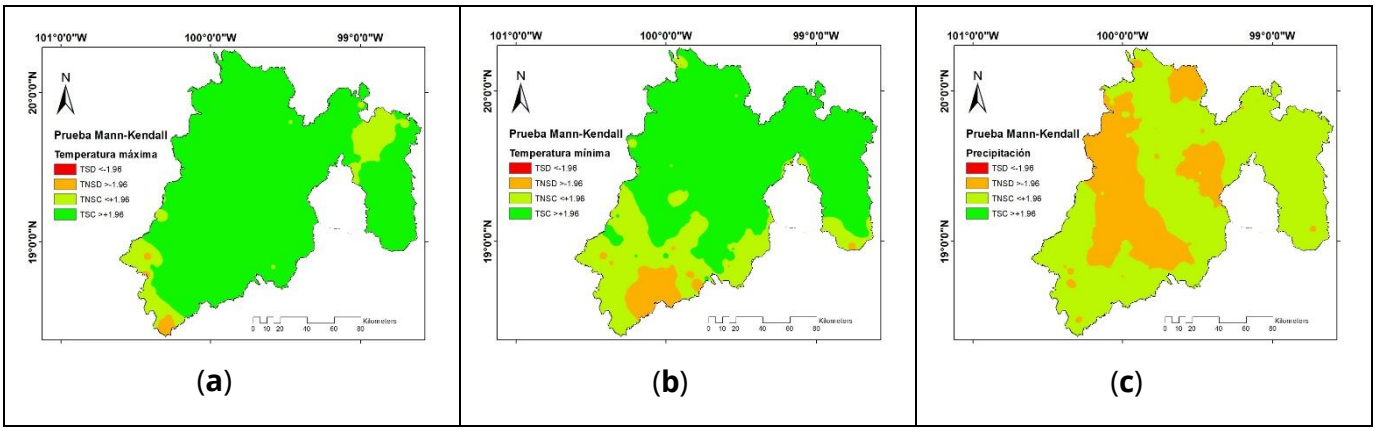
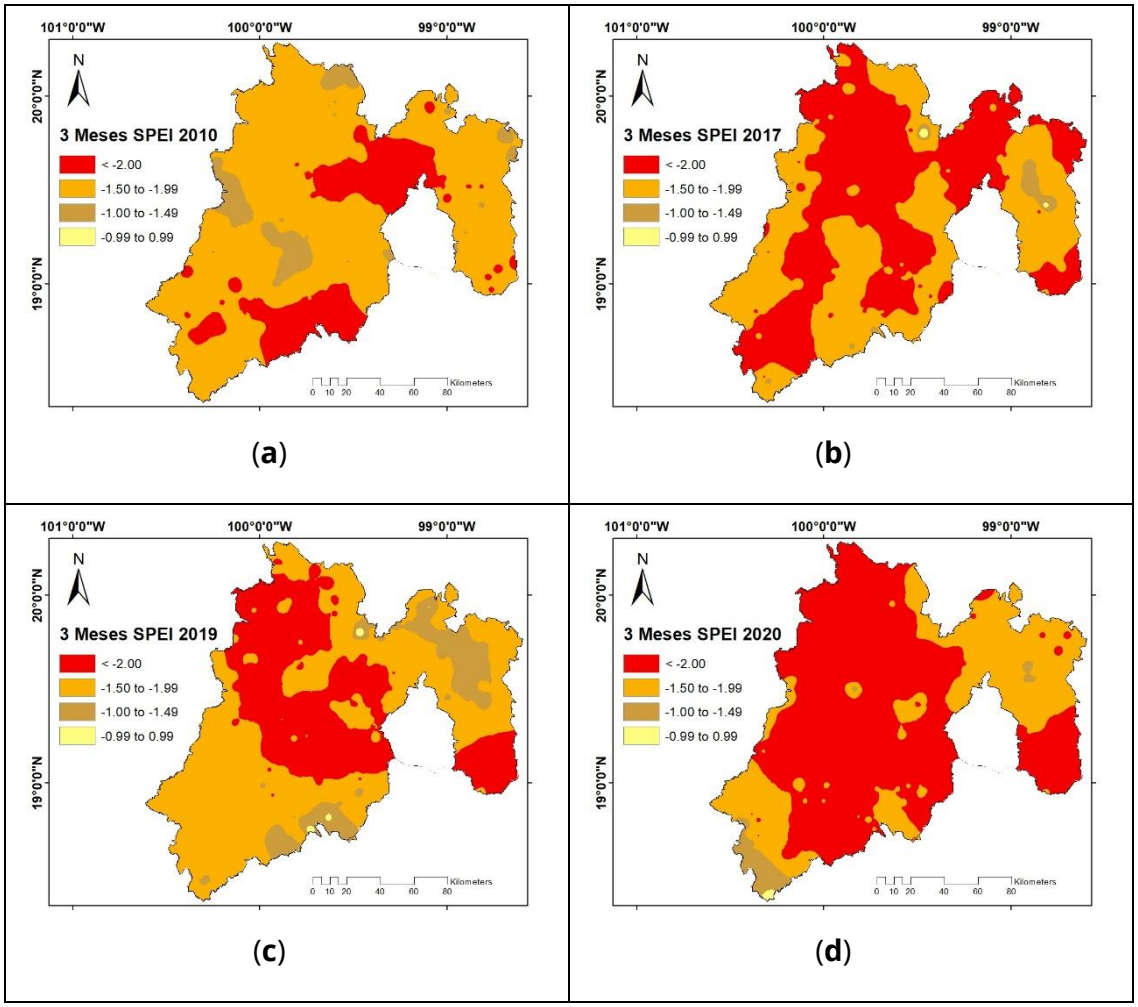


Figure 2. Tendencias de las variables analizadas en la zona de estudio (TSC: Tendencia creciente significativa; TNSC: Tendencia creciente no significativa; TNSD: Tendencia decreciente no significativa; TSD: Tendencia decreciente significativa): (**a**) prueba de Mann-Kendall para la temperatura máxima; (**b**) prueba de Mann-Kendall para la temperatura mínima; (**c**) prueba de Mann-Kendall para las precipitaciones.

El SPEI se evaluó en múltiples escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses), capturando tanto la variabilidad a corto como a largo plazo de las condiciones de sequía y humedad. Se hizo hincapié en el SPEI de 3 meses (Figura 3), centrándose en las tendencias estacionales de 2010 a 2023.

Los años de sequía más severa fueron 2010, 2017, 2019, 2020, 2021 y 2023, con extensas zonas incluidas en la clasificación “Extremadamente seco” para los valores mínimos. Una tendencia preocupante se observa en los valores SPEI mínimos, que muestran de forma consistente un cambio hacia condiciones de sequía más severas a lo largo de los años. La categoría “Extremadamente seco” se ha ampliado geográfica y temporalmente, lo que indica una intensificación de las sequías.

El análisis SPEI revela un patrón dual de años con condiciones de sequía cada vez más severas. Esto pone de manifiesto la vulnerabilidad de la región a los excedentes y déficits hidrológicos extremos. La intensificación de las sequías, especialmente en la última década, plantea riesgos significativos para la agricultura, la gestión del agua y la estabilidad de los ecosistemas. Los resultados subrayan la necesidad de estrategias adaptativas para gestionar eficazmente los recursos hídricos, especialmente durante los periodos prolongados de sequía.



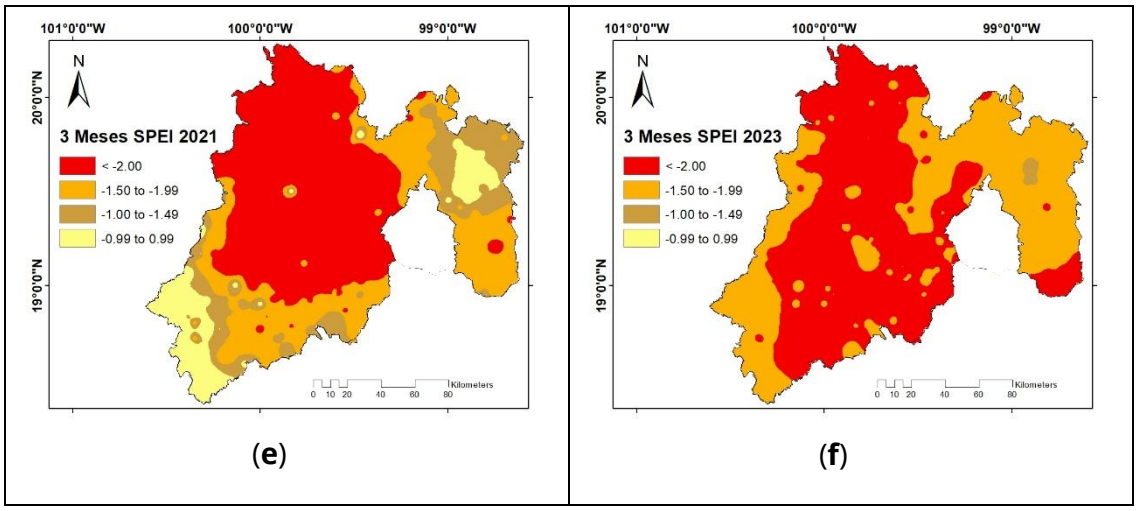


Figure 3. Sequías más severas calculadas para una escala de tiempo de 3 meses con valores SPEI: (a) escala de tiempo de 3 meses SPEI para 2010; (b) escala de tiempo de 3 meses SPEI para 2017; (c) escala de tiempo de 3 meses SPEI para 2019; (d) escala de tiempo de 3 meses SPEI para 2020; (e) escala de tiempo de 3 meses SPEI para 2021; (c) escala de tiempo de 3 meses SPEI para 2023.

El análisis de la sequía de seis meses (Figura 4) entre 2020 y 2023 muestra una intensificación de la aridez en la región, afectando la disponibilidad de agua para la agricultura y la gestión hídrica. La severidad de la sequía ha aumentado constantemente, con periodos de alivio cada vez más breves. En 2016, las condiciones eran estables, pero a partir de 2017, la sequía se expandió, alcanzando su punto máximo en 2019 con sequía extrema en la mayor parte de la región. Aunque hubo una leve recuperación en 2020, la sequía severa continuó y en 2023 se alcanzaron condiciones extremadamente secas, convirtiéndose en uno de los períodos más severos.

Los años más secos fueron 2019, 2021 y 2023, con reducción significativa de condiciones húmedas. El análisis muestra una pérdida de resiliencia hídrica, con más sequías y menos periodos de humedad, debido al aumento de la evapotranspiración por el incremento de temperaturas. Esto representa riesgos críticos para la agricultura y la seguridad hídrica.

Se requiere implementar estrategias de adaptación como el uso eficiente del riego, cultivos tolerantes a la sequía y sistemas de alerta temprana. El análisis confirma que la región enfrenta una crisis hídrica progresiva que exige medidas urgentes de gestión del agua y planificación agrícola para mitigar los efectos de la variabilidad climática y el estrés hídrico.

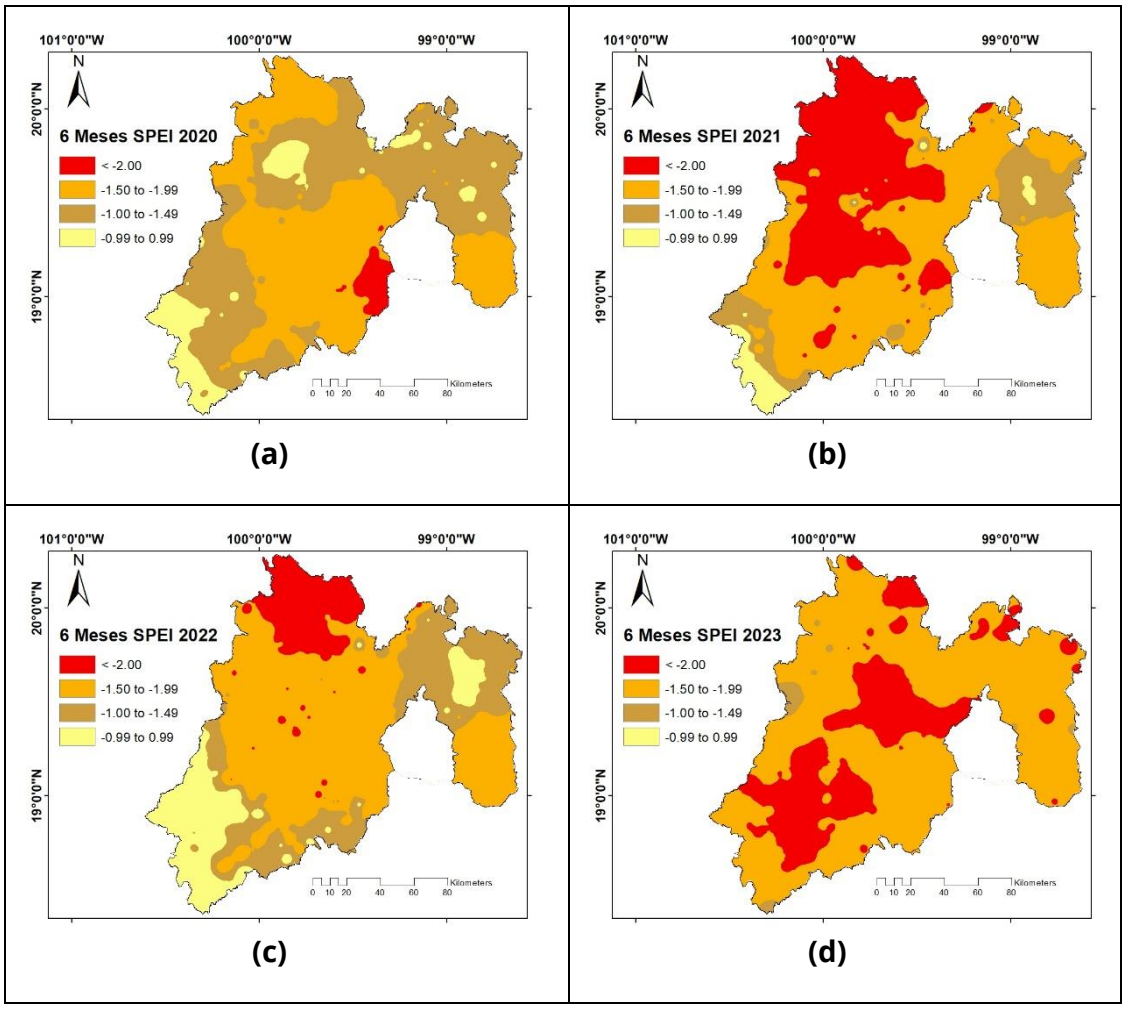


Figure 4. Los índices de sequía semestral más severos en el Estado de México: (a) SPEI semestral para 2020; (b) SPEI semestral para 2021; (c) SPEI semestral para 2022; (d) SPEI semestral para 2023.

4. Discusión

El análisis de 42 años revela un aumento en la severidad y frecuencia de las sequías en el Estado de México, impulsado por el cambio climático y las actividades humanas. Este patrón se alinea con estudios previos que destacan el impacto del aumento de las temperaturas en la exacerbación de las sequías, afectando negativamente la agricultura al alterar el balance hídrico y la evapotranspiración.

El uso de datos satelitales como CHIRPS y DAYMET ha sido clave para superar las limitaciones de las estaciones meteorológicas terrestres, permitiendo una medición precisa de la precipitación y temperatura. Las discrepancias en los valores del SPEI por los métodos de cálculo de la evapotranspiración destacan la necesidad de un enfoque metodológico más homogéneo en investigaciones futuras.

El análisis de tendencias climáticas mostró un aumento significativo en las temperaturas máximas y mínimas, lo que contribuye a una mayor

evapotranspiración y agrava la escasez de agua. Estos hallazgos subrayan la importancia de incluir la temperatura en los índices de sequía como el SPEI, para mejorar la predicción de los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua.

La región occidental del Estado de México, clave para el suministro de agua y la recarga de acuíferos, es particularmente vulnerable a las sequías prolongadas. Los cambios en el uso del suelo, como la urbanización y la reducción de tierras agrícolas y boscosas, han disminuido la capacidad de la región para manejar los recursos hídricos, lo que exige estrategias de gestión del suelo y planificación urbana que fomenten la conservación.

El SPEI ha demostrado ser más efectivo que otros índices, ya que captura tanto las anomalías de precipitación como de temperatura, lo que es esencial para la agricultura y la gestión del agua. Estos hallazgos enfatizan la necesidad urgente de estrategias de gestión hídrica proactivas, como el uso sostenible de las aguas subterráneas, la mejora de infraestructuras y la reforestación.

Para mejorar las políticas y estrategias de manejo, es esencial integrar variables socioeconómicas en los modelos de predicción de sequías y fortalecer la sinergia entre modelos climáticos y datos satelitales, lo que permitirá una mejor adaptación a las condiciones climáticas futuras y reducirá los efectos negativos sobre la agricultura y la seguridad hídrica.

5. Conclusiones

El análisis sobre las sequías en el Estado de México destaca el aumento en la severidad y frecuencia de estos eventos, impulsados por las altas temperaturas, el crecimiento poblacional y la urbanización. Las bases de datos como CHIRPS y DAYMET fueron fundamentales para superar las limitaciones de las estaciones meteorológicas y permitir un monitoreo más preciso.

La prueba de Mann-Kendall evidenció un aumento significativo de las temperaturas, lo que ha exacerbado la evapotranspiración y los déficits de agua, intensificando la severidad de las sequías, con un impacto directo en la agricultura. El SPEI mostró que los eventos de sequía extrema se han vuelto más frecuentes, especialmente en la región occidental del Estado de México, clave para el suministro de agua y la recarga de acuíferos.

Este estudio resalta la urgencia de estrategias de gestión del agua que consideren tanto los factores climáticos como las actividades humanas. El uso de índices avanzados como el SPEI permitirá mejorar la comprensión de las sequías y diseñar

políticas más efectivas. Futuros estudios deben integrar variables socioeconómicas, como el crecimiento poblacional y el consumo de agua, para desarrollar marcos de monitoreo y gestión más completos y adaptados a la región.

Author Contributions: Conceptualization, M.C.-C. and L.I.-C.; methodology, M.C.-C.; software, M.C.-C.; validation, L.I.-C., R.A.-R. and G.A.-G.; formal analysis, M.C.-C.; investigation, M.C.-C.; resources, M.C.-C.; data curation, R.A.-R.; writing—original draft preparation, M.C.-C.; writing—review and editing, L.I.-C.; visualization, L.I.-C.; supervision, L.I.-C.; project administration, L.I.-C.; funding acquisition, M.C.-C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the National Council of Humanities, Science and Technology, CONAHCYT, of Mexico, grant number 320262.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Climate Engine (http://ClimateEngine.org)

Acknowledgments: To the National Council of Humanities, Science and Technology, CONAHCYT, of Mexico for the financial support provided in the form of a postgraduate maintenance scholarship for the development of this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Referencias

1. Dalezios, N.R.; Dunkel, Z.; Eslamian, S. Meteorological Drought Indices: Definitions. In Handbook of Drought and Water Scarcity; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017; pp. 27–44.
2. Wilhite, D.A., (2000): Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In Drought: a global assessment. (D. Wilhite ed.). Vol 1: 3-18.
3. Naumann, G.; Alfieri, L.; Wyser, K.; Mentaschi, L.; Betts, R.A.; Carrao, H.; Spinoni, J.; Vogt, J.; Feyen, L. Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. Geophys. Res. Lett. 2018, 45, 3285–3296.
4. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 23(7), 1696–1718.
5. Vicente-Serrano, Sergio M. & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). 2024 "The Climate Data Guide: Stand-ardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)." Recover abril, 2023 de https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei.
6. Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., et al. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144(Suppl. 1), 292–312.
7. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Ríos Fuerte y Sinaloa, Ciudad de México, México.
8. INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2023). Censo de Población y Vivienda 2023. México.
9. INEGI monografías. 2024. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/ . Consultado 19 noviembre 4, 2024.
10. INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2023. 2020 Censo de Población y Vivienda. México. https://www.inegi.org.mx/datosabiertos/.
11. HydroGeoLogic, Inc.-OU-1 Informe anual de monitoreo de aguas subterráneas de 2023: antiguo Fort Ord, California, 2024.
12. Kendall, M. G. 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin. London. p.120.
13. Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica 13, 245-259.
14. Climate Engine. 2024. Desert Research Institute and University of California, Merced. Recuperado 1 abril 2024. http://climateengine.org, version 2.1.
15. Huntington, J., Hegewisch, K., Daudert, B., Morton, C., Abatzoglou, J., McEvoy, D., and T., Erickson. 2017. Climate Engine: Cloud Computing of Climate and Remote Sensing Data for Advanced

Natural Resource Monitoring and Process Under-standing. Bulletin of the American Meteorological Society, http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-15-00324.1
16. Google Earth and Earth Engine. 2019. Climate Engine maps and time series help scientists and managers see and study earth observation data. Recuperado 16 abril 2024. https://medium.com/google-earth/climate-engine-maps-and-time-series-help-scientists-and-managers-see-and-study-earth-observation-d59496444475
17. Funk, C., Michaelsen, J. and Marshall, M. 2012. Mapping recent decadal climate variations in precipitation and temperature across Eastern Africa and the Sahel. In: Wardlow, B., Anderson, M. and Verdin, J. (Eds.) Remote Sensing of Drought—Innovative Monitoring Approaches. London: Taylor and Francis, pp. 331–357.
18. Maidment, R., Grimes, D., Black, E. et al. A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. Sci Data 4, 170063 2017. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63
19. Thornton, M.M., R. Shrestha, Y. Wei, P.E. Thornton, S-C. Kao, and B.E. Wilson. 2022. Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4 R1. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2129
20. Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L., Valdés, J.B., Arteaga-Ramírez, R. 2017. Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. Tecnología y Ciencias del Agua: 8(1) 35-52.
21. Carrillo-Carrillo, M.; Ibáñez-Castillo, L.; Arteaga-Ramírez, R.; Arévalo-Galarza, G. Spatio-Temporal Analysis of Drought with SPEI in the State of Mexico and Mexico City. Atmosphere 2025, 16, 202. https://doi.org/10.3390/atmos16020202
22. Beguería, S., & Vicente, S. 2014. Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Package SPEI.R for R or RStudio Program. https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html. (Recuperado: 13 mayo 2023).
23. McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society Boston, MA, pp. 179–183.

Máquina lavadora de rizomas: difusão tecnológica

Sara de Souza Manso[1]; Raphael Magalhães Gomes Moreira[2]; Rainer Nicchio Anselmo[3]; Jhonatan Livan dos Santos Conceição[4]

1 Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; saraagro2021@gmail.com

2 Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; raphael.moreira@ifes.edu.br

3 Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; rainernicchio0@gmail.com

4 Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; jhonatan.agroengenharia@gmail.com

* Correspondência: saraagro2021@gmail.com

Resumo: O projeto de pesquisa realizado no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) focou no desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida para a etapa de lavagem do gengibre na pós-colheita, visando otimizar a cadeia produtiva do gengibre, essencial nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. O projeto se concentrou na difusão de tecnologias inovadoras, promovendo a eficiência na produção e qualidade do gengibre, com ênfase no uso de práticas agrícolas sustentáveis e na transferência de conhecimento aos produtores, cooperados e exportadores.

Palavras-chave: Gengibre, material instrucional, cadeia produtiva, tecnologia

1. Introducão

A cadeia produtiva do gengibre (*Zingiber officinale Roscoe*) vem ganhando destaque no cenário agrícola mundial devido às suas diversas aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. No Brasil, a produção de gengibre está concentrada em regiões como os estados de São Paulo, Paraná e Espírito Santo, onde as condições climáticas e de solo são adequadas para o crescimento desta espécie. Porém, um dos principais desafios enfrentados pelos produtores, cooperados e importadores nesta cadeia produtiva é a necessidade constante de atualização e acesso a tecnologias inovadoras que possam melhorar a eficiência e a qualidade da produção. Neste contexto, o direcionamento do processo de difusão tecnológica na cadeia do gengibre é essencial para garantir o crescimento sustentável do setor. A difusão tecnológica, entendida como o processo pelo qual novas tecnologias são distribuídas e adotadas por um grupo de indivíduos ou organizações, desempenha um papel crucial no aumento da produtividade, na redução de custos e no aumento da produtividade no mercado global. Além disso,

o acesso a tecnologias pós-colheita, como métodos de secagem e conservação, pode aumentar significativamente a qualidade do produto final, atendendo assim às demandas dos mercados interno e externo. Entretanto, a adoção dessas inovações não ocorre de forma automática. Ela depende de uma série de fatores, incluindo o nível de conhecimento e capacitação dos produtores, a estrutura organizacional das cooperativas e a capacidade de adaptação dos importadores às exigências do mercado internacional. É neste cenário que se torna crucial o papel de agentes que possam liderar o processo de transferência de tecnologia, garantindo que as inovações cheguem de forma eficiente e eficaz a todos os elos da cadeia produtiva. Este trabalho apresenta os materiais gráficos informativos elaborados pela equipe de projeto para a difusão de conhecimentos sobre a tecnologia desenvolvida para lavagem de rizomas.

2. Materiais e Métodos

Para a elaboração das artes para disseminação da tecnologia, foi utilizado o aplicativo Canva®. Foram coletados os materiais e as artes foram baseadas nesses materiais tendo sempre em vista planejar algo de fácil compreensão, pensando nos produtores rurais que irão receber essas artes. O aplicativo Canva tem como objetivo criar documentos de marketing para o público em geral, sejam eles estudantes, professores, criadores de conteúdo dentre outras diversas profissões, sendo bem amplo e completo. O mesmo te possibilita a escolha entre o plano gratuito e o plano Pro, essa segunda opção de plano abrange mais artes, fontes, sendo uma melhor escolha para o âmbito profissional. Há a possibilidade de criar publicidades, slides, editar fotos, criar logotipos e diversas outras formas de mídia digital. Facilitar a difusão de tecnologia na cadeia produtiva do gengibre, sendo primeiro, as principais questões e tecnologias relevantes para os produtores de gengibre foram identificadas através de uma análise detalhada das práticas agrícolas existentes e das inovações disponíveis. Com base nessas informações, foram criados roteiros e conceitos visuais para traduzir esses temas em artes visuais impactantes e educativas. A plataforma Canva foi escolhida por sua interface intuitiva e diversos recursos que permitem criar designs gráficos atraentes e acessíveis sem a necessidade de conhecimentos avançados de design. A partir disso, foram desenvolvidos materiais visuais como infográficos e cartazes, que explicam de forma clara e atrativa os benefícios e a aplicação de tecnologias na produção de gengibre.

3. Resultados

Foi observado que os materiais visuais facilitaram a comunicação de conceitos complexos, como a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e o uso de tecnologias

inovadoras, promovendo uma melhor assimilação das informações pelos participantes. Além disso, os conhecimentos adquiridos nos cursos oferecidos pela ACADEMIA OMPI (WIPO) – como "Busca de Informações de Patentes", "Patentes", "Noções básicas de Redação de Pedidos de Patentes", "Marcas, Desenhos Industriais e Indicações Geográficas" e o "Curso Geral de Propriedade Intelectual" – foram fundamentais para a elaboração dos conteúdos artísticos. Esses cursos proporcionaram uma base sólida de conhecimento sobre proteção de propriedade intelectual e gestão de ativos intangíveis, permitindo que as artes desenvolvidas não só informassem sobre novas tecnologias, mas também educassem os produtores sobre a importância da proteção de suas inovações e da correta utilização de marcas e desenhos industriais. A discussão destes resultados mostra que a integração do conhecimento técnico de propriedade intelectual com métodos de comunicação visual pode ser uma estratégia eficaz para a difusão de tecnologia em contextos agrícolas. A abordagem adotada demonstra o potencial de combinar arte e ciência para promover o progresso no sector agrícola, garantindo que os agricultores tenham acesso à informação de uma forma clara, acessível e juridicamente segura.

A fim de desenvolver s materiais informacionais, foram adotados os conteúdos presentes nos seguintes cursos ofertados pela ACADEMIA OMPI (WIPO):

• Busca de Informações de Patentes

• Patentes Noções básicas de Redação de Pedidos de Patentes

• Marcas, Desenhos Industriais e Indicações Geográficas

• Curso Geral de Propriedade Intelectual

O primeiro material informacional criado foi o intitulado “7 Passos para entender sobre Patentes”, apresentado a seguir na Figura 1, que ilustra as questões mais introdutórias sobre o tema, sendo destinado a produtores rurais.

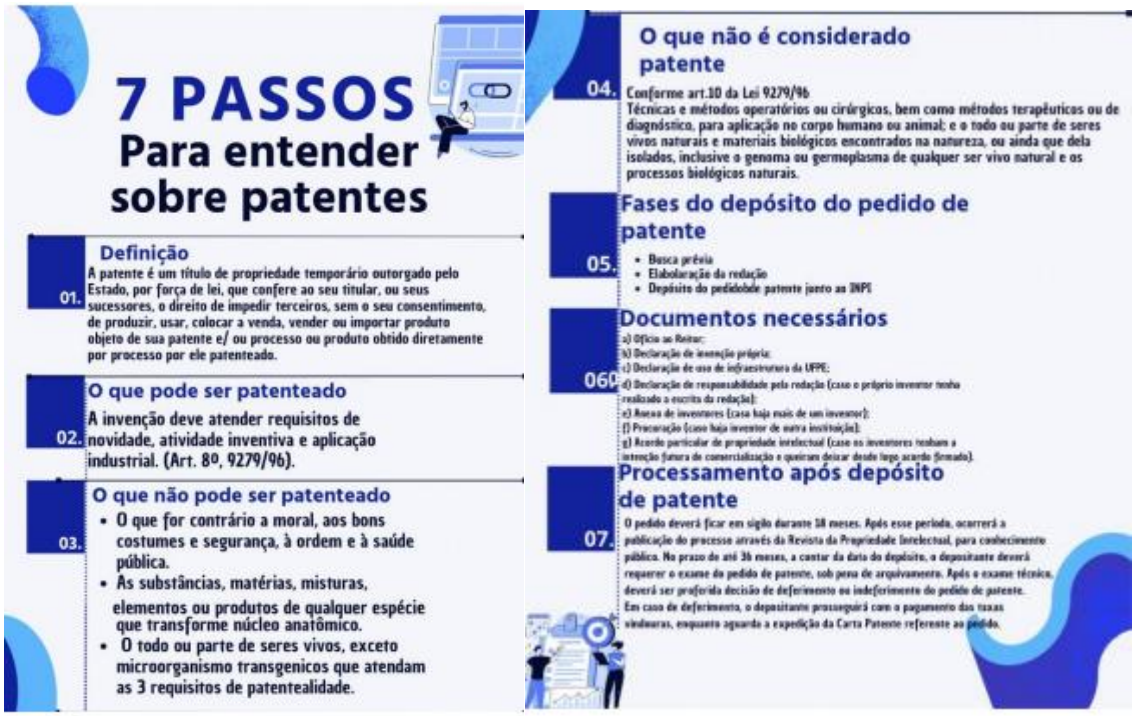


Figura 1. Os 7 passos para entender sobre patentes
Fonte: Equipe do projeto

O segundo material informacional criado foi o intitulado “Entendendo sobre Patentes”, apresentado a seguir na Figura 2, sendo destinado aos estudantes do Ifes campus Itapina para introduzir o tema sobre patentes.

Figura 2. Entendendo sobre patentes.
Fonte: Equipe do projeto.

Para a construção do material das figuras 1 e 2, foram realizados os cursos na plataforma do INPI e uma compilação de informações mais diretas e que poderiam auxiliar aos destinatários (produtores rurais e alunos do Ifes campus Itapina) sobre o tema patentes. Destaca-se que a realização dos referidos cursos é de suma importância, pois não existe componente específico obrigatório que trate exclusivamente sobre o tema.

O terceiro material informacional criado foi o intitulado "Fluxograma de Beneficiamento do Gengibre", apresentado a seguir na Figura 3, sendo destinado aos produtores, extensionistas, pesquisadores e estudantes do Ifes campus Itapina para introduzir o tema sobre a cadeia da produção do gengibre.

Figura 3. Fluxograma de Beneficiamento do Gengibre.

Fonte: Equipe do projeto.

Para construção deste material (Figura 3), foram realizadas visitas em propriedades rurais e em unidades exportadoras da região de Serrana do Espírito Santo. Nas conversas e entrevistas, foram realizadas anotações de obrigatoriedades que as legislações exigiam para que o produto fosse do solo (colheita) até o momento da exportação. Com a realização das visitas, foram feitos levantamentos sobre tipos de patentes pertinentes ao projeto, com o objetivo da construção de um material instrucional para produtores rurais, exportadores, pesquisadores, engenheiros e extensionistas sobre o uso do lavador resultante de outro plano de trabalho, dentro

do macro projeto “Desenvolvimento de um Protótipo em escala reduzida para etapa de lavagem na Pós-Colheita do Gengibre“. Alguns elementos que envolveram a patente do lavador resultante do projeto macro, que pertence ao Programa de Fortalecimento da Agricultura Capixaba - FORTAC do Ifes são apresentados no quarto material instrucional (Figura 4), a seguir.

Figura 4. Manual de funcionamento do lavador de rizomas.
Fonte: Equipe do projeto.

4. Discussão

A difusão de tecnologias inovadoras para a cadeia produtiva do gengibre exige estratégias eficazes de comunicação, capazes de traduzir conceitos técnicos em informações acessíveis a diferentes públicos, como produtores rurais, pesquisadores e estudantes. Neste estudo, a utilização de materiais visuais, como infográficos e fluxogramas, mostrou-se uma abordagem promissora para facilitar a assimilação dos conteúdos.

A criação de materiais instrucionais baseados na Propriedade Intelectual e nos processos da pós-colheita do gengibre evidencia uma comunicação estruturada em três pilares: clareza, acessibilidade e aplicabilidade prática. O desenvolvimento desses materiais foi orientado pela necessidade de adaptar a linguagem técnica à realidade dos produtores rurais, garantindo que o conhecimento fosse compreendido e aplicado na rotina do campo.

Para os produtores rurais, a abordagem visual e direta foi essencial para garantir que as informações fossem absorvidas de forma prática e objetiva. O "Fluxograma de Beneficiamento do Gengibre" e o "Manual de Funcionamento do Lavador de Rizomas" exemplificam como a comunicação visual pode auxiliar na implementação de novas tecnologias na produção. Além disso, os conteúdos abordados no material relacionado à proteção de patentes são fundamentais para conscientizar os produtores sobre a importância da Propriedade Intelectual, incentivando a inovação e a valorização do conhecimento técnico no setor agrícola.

No caso dos pesquisadores e estudantes, os materiais informacionais desenvolvidos a partir dos cursos da Academia OMPI (WIPO) representam um avanço na disseminação de conhecimentos sobre patentes e inovação tecnológica. A ausência de componentes curriculares obrigatórios sobre o tema reforça a relevância da criação desses conteúdos como estratégia complementar de ensino. Ao integrar aspectos técnicos e jurídicos da inovação ao ensino formal, o estudo fortalece a formação acadêmica e prepara melhor os futuros profissionais para atuar no setor agropecuário.

Outro ponto relevante foi a escolha da plataforma Canva® para o desenvolvimento dos materiais gráficos, possibilitando a produção de conteúdos com design atrativo e acessível. Essa estratégia demonstra que a difusão tecnológica pode ser otimizada pelo uso de ferramentas digitais que democratizam o acesso à informação e facilitam sua aplicação em diferentes contextos.

A partir desses resultados, percebe-se que a comunicação eficiente na difusão tecnológica não se restringe à simples transmissão de informações, mas sim à

adaptação da linguagem, do formato e da abordagem conforme o perfil do público-alvo. O impacto dessa estratégia pode ser observado na maior compreensão e adesão dos produtores às práticas recomendadas, na qualificação dos estudantes e pesquisadores sobre inovação tecnológica e no fortalecimento do diálogo entre academia e setor produtivo.

5. Conclusões

O estudo demonstrou que a comunicação é um elemento-chave para a difusão tecnológica na cadeia produtiva do gengibre, assim como em outros setores, garantindo que inovações desenvolvidas no meio acadêmico sejam efetivamente absorvidas por produtores, pesquisadores e estudantes. A utilização de materiais visuais e instrucionais, aliados a conteúdos estratégicos sobre propriedade intelectual e inovação, favoreceu a assimilação dos conceitos e a aplicação prática das tecnologias pós-colheita.

Os resultados indicam que a adaptação da linguagem técnica, o uso de ferramentas digitais e a abordagem visual são essenciais para tornar a comunicação mais acessível e impactante. No caso dos produtores rurais, os materiais gráficos facilitaram a compreensão de processos produtivos e regulatórios, contribuindo para a melhoria das práticas agrícolas e para o fortalecimento da inovação no setor. Para estudantes e pesquisadores, a introdução de conteúdos sobre patentes e propriedade intelectual ampliou o conhecimento sobre a proteção de inovações, promovendo uma visão mais abrangente sobre o desenvolvimento tecnológico.

Dessa forma, a pesquisa reforça a necessidade de estratégias multimodais e interdisciplinares na comunicação da difusão tecnológica, garantindo que o conhecimento produzido no meio acadêmico seja efetivamente aplicado no setor produtivo. Além disso, evidencia o potencial de metodologias comunicativas inovadoras para estreitar a relação entre ciência, tecnologia e sociedade, fortalecendo o desenvolvimento sustentável e competitivo da cadeia produtiva do gengibre.

Outra conclusão pessoal importante de ser citada, foi o crescimento pessoal dos estudantes bolsistas envolvidos no desenvolvimento dos materiais, que através da possibilidade da pesquisa, pode ter acesso ao tema inovação, patentes e transferência de tecnologia, pela indicação de diversos cursos da plataforma do INPI, tendo agregado esses conhecimentos a sua formação profissional no curso de agronomia. Conclui-se que a utilização das artes visuais criadas com a plataforma Canva, aliada aos conhecimentos adquiridos nos cursos da ACADEMIA WIPO, tem sido eficaz na disseminação de tecnologias e na conscientização da propriedade intelectual na cadeia produtiva do gengibre. Essa abordagem inovadora tem

facilitado a compreensão das práticas tecnológicas e a proteção dos ativos intangíveis, promovendo um ambiente de maior engajamento e adoção de inovações pelos produtores. A integração da arte e da ciência provou ser uma ferramenta poderosa para melhorar a comunicação e aumentar a sustentabilidade e a competitividade do setor agrícola.

Contribuições dos Autores: Conceitualização, SSM, RMGM; metodologia, SSM, RMGM; análise formal, SSM, RMGM; validação RMGM; investigação, SSM, RNA, JLSC; curadoria de dados, SSM, RNA, JLSC; redação – preparação do rascunho original, SSM; redação – revisão e edição, RMGM; supervisão, RMGM. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa contou com financiamento de bolsas pelo Instituto Federal do Espírito Santo.

Declaração do Comitê de Ética Institucional: Não se aplica.

Declaração de Consentimento Informado: Não se aplica.

Declaração de Disponibilidade de Dados: Os dados coletados, que sustentam os resultados relatados, se encontram em posse dos pesquisadores, não havendo dados arquivados publicamente.

Agradecimentos: Instituto Federal do Espírito Santo e Ifes Campus Itapina.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL. Curso de Busca de Informações de Patentes. Disponível em: https://www.wipo.int/portal/en/. Acesso em: 30 ago. 2024.
2. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL. Curso de Patentes. Disponível em: . Acesso em: 30 ago. 2024.
3. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL. Noções Básicas de Redação de Pedidos de Patentes. Disponível em: https://www.wipo.int/portal/en/. Acesso em: 30 ago. 2024.
4. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL. Curso sobre Marcas, Desenhos Industriais e Indicações Geográficas. Disponível em: https://www.wipo.int/portal/en/. Acesso em: 30 ago. 2024.
5. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL. Curso Geral de Propriedade Intelectual. Disponível em: https://www.wipo.int/portal/en/. Acesso em: 30 ago. 2024.
6. COSTA, Maria Helena. Tecnologias agrícolas e inovação: um guia para produtores. 1. ed. São Paulo: Editora Agrícola, 2023.
7. PEREIRA, Ana. A difusão de tecnologia na agricultura e o papel das artes visuais. Revista Brasileira de Inovação Agrícola, Brasília, v. 15, n. 3, p. 35-50, jul. 2022.
8. SILVA, João Pedro. Inovação tecnológica na cadeia produtiva do gengibre. In: MENDES, Carla (Org.). Inovação e Sustentabilidade na Agricultura Brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Rural, 2024. p. 101-120.

Avaliação do desempenho de espalhadores de estrume na aplicação localizada de composto em olival

António Bento Dias [1*], Ivo Lourenço Dias [2], José Falcão [3] Vasco Cruz [4]

[1] MED- Instituto Mediterrânico para Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento & Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Portugal; adias@uevora.pt

[2] MED- Instituto Mediterrânico para Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Portugal; ivo_dias61@hotmail.com

[3] Sociedade Agrícola Torre das Figueiras Lda, Herdade da Torre das Figueiras, 7450-999 Monforte, Portugal; cffjosefalcao@gmail.pt

[4] MED- Instituto Mediterrânico para Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento & Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Portugal; vfc@uevora.pt

* Correspondence: adias@uevora.pt

Abstract: Sendo a compostagem de bagaço de azeitona com folhas de oliveira e estrume de ovinos ou bovinos uma técnica exequível ao nível da exploração agrícola, apenas será possível fechar o ciclo da economia circular com a sua aplicação no solo do olival. Tal requer que se disponha de tecnologia que garanta a colocação do composto à taxa pretendida no local desejado. Avaliou-se a utilização de dois semi-reboques distribuidores de estrume na aplicação localizada de composto na faixa de solo coincidente com a linha de plantação de um olival em sebe. Em três linhas aleatoriamente selecionadas para cada um dos equipamentos, registou-se o tempo gasto na distribuição de cada carga, o número de árvores por carga e registou-se por amostragem a massa de composto distribuída ao solo.

Os resultados obtidos revelaram que qualquer dos equipamentos permite a localização de idênticas doses de composto com velocidades de avanço que não diferiram significativamente entre si.

Palavras-chave: d*istribuição; composto; velocidade aplicação; estimativa capacidade trabalho*

1. Introdução

A melhoria da sustentabilidade económica e ambiental do setor olivícola passa pela adoção de práticas de economia circular para valorização de três tipos de sub-produtos: restos de poda, folhas da limpeza da azeitona colhida e bagaço de azeitona. Enquanto os restos de poda são normalmente fragmentados restituindo essa fonte orgânica na entrelinha do olival, as folhas da limpeza da azeitona não

têm qualquer aproveitamento e o bagaço de azeitona após a extração do óleo pode ainda ter diversas aplicações.

Uma alternativa de valorização do bagaço é a sua compostagem com outros sub-produtos orgânicos como folhas de oliveira e estrume de ovinos ou bovinos. Embora seja uma técnica testada e viável, com um baixo custo, que permite transformar subprodutos orgânicos em corretivos orgânicos [1], a sua utilização não está generalizada.

A adoção da economia circular requer que se disponha de tecnologia para aplicar composto na faixa de solo coincidente com a linha de plantação, como forma de melhorar a acumulação de matéria orgânica no solo [2].

No âmbito do projeto **INOVCIRCOLIVE** - Inovação e Circularidade no Setor Oleícola [3], avaliou-se a utilização de dois modelos comerciais de semi-reboques distribuidores localizadores de estrume na aplicação localizada de composto em olival conduzido em sebe.

Os resultados obtidos revelaram que qualquer dos equipamentos permite a localização das doses de composto pretendidas, mas a sua capacidade de carga revelou que a área de olival com aplicação de compost por carga é pequena.

2. Materiais e Métodos

2.1 Olival

Os ensaios foram efetuados na Herdade da Torre das Figueiras. Monforte, Portugal, (Coordenadas: 38º 05’ 15” N e 07º 16' 39'' W) numa parcela de olival em sebe da variedade Arbosana instalado em outubro de 2021 com 5m de entrelinha e 1,5m de distância entre árvores na linha (Figura 1).

Figura 1. Aspeto do olival em sebe da variedade Arbosana

Figura 2. Semi-reboque distribuidor lDavid

2.2. Equipamentos

2.2.1 Semi-reboque distribuidor IDavid

Utilizou-se um semi-reboque distribuidor de estrume IDavid (Figura 2). Trata-se de um distribuidor de estrume com 6m^3 de capacidade com descarga traseira no qual foi montada uma unidade para aplicação localizada.

Esta máquina requer fornecimento de óleo a partir do serviço externo do sistema hidráulico (SESH) do trator, para acionar o *transportador de correntes e travessas* do fundo móvel da caixa de carga (Figura 3), o *transportador transversal traseiro (Figura 4) e o rotor de espalhamento* (Figura 5).

Figura 3. Transportador de correntes e travessas da caixa de carga

Figura 4. Transportador transversal traseiro

Figura 5. Rotor de espalhamento

Figura 6. Comporta traseira

Para controlo da massa de material descarregada no transportador transversal traseiro dispõe de uma comporta acionada hidraulicamente (Figura 6).

2.2.1.1. Regulação do semi-reboque distribuidor IDavid

A velocidade de deslocamento do transportador de correntes e travessas do fundo móvel, a velocidade de deslocamento do transportador transversal traseiro e a velocidade do rotores de espalhamento é determinada pelo caudal recebido do SESH do trator. O circuito hidráulico dispõe de válvulas reguladoras de caudal que permitem variar a velocidade de rotação de cada um dos componentes acima indicados (Figura 7).

Figura 7. Vávulas reguladoras fluxo de distribuição

Figura 8. Semi-reboque distribuidor Herculano + trator tapete transportador e rotor

2.2.2. Semi-reboque distribuidor Herculano

Utilizou-se um semi-reboque distribuidor de estrume Herculano H2RSP (Figura 8). Trata-se de um distribuidor de estrume com 5m^3 de capacidade, concebido para aplicação na linha de culturas permanentes.

Esta máquina tem sistema hidráulico autónomo, dispondo de uma bomba de óleo acionada pela tomada de força do trator (Figura 9).

Figura 9. Bomba do sistema hidráulico do distribuidor

Figura 10. Transportador de correntes e travessas do fundo móvel

Este sistema hidráulico permite acionar o *transportador de correntes e travessas* do fundo da caixa de carga (Figura 10) e os *transportadores sem-fim* que transportam lateralmente o material a espalhar (Figura 11).

Figura 11. Transportadores sem-fim

Figura 12. Comporta regulada por um cilindro hidráulico

O controlo da massa de estrume descarregada pelo fundo móvel para os *transportadores sem-fim* é efetuado por uma comporta controlada hidraulicamente (Figura 12). Dos *transportadores sem-fim* o material a espalhar cai sobre *rotores de espalhamento*, colocados à direita e à esquerda da máquina (Figura 13) acionados hidraulicamente a partir serviço externo do sistema hidráulico do trator.

Figura 13. *Rotores de espalhamento* (rotor esquerdo)

Figura 14. Válvulas de controlo da velocidade rotação

2.2.2.1. Regulação do semi-reboque distribuidor Herculano H2RSP

A velocidade de deslocamento do *transportador de correntes e travessas* do fundo da caixa de carga e, simultaneamente, a velocidade de rotação dos *transportadores sem-fim* que transportam lateralmente o material a espalhar é controlada por uma válvula, tal como a velocidade de rotação dos ***r**otores de espalhamento* (Figura 14).

2.3. Tratores

Utilizou-se o trator Kubota 9960 de 75 kW de potência máxima (Figura 15) com o semi-reboque distribuidor IDavid e com o semi-reboque Herculano foi utilizado o trator Massey Ferguson 5709M de 74 kW de potência máxima (Figura 16).

Figura 15. Trator Kubota 9960

Figura 16. Trator Massey Ferguson 5709M

2.4. Metodologia

Para testagem de cada um dos semi-reboques distribuidores foram aleatoriamente selecionadas 3 linhas de árvores.

Após a carga de cada semi-reboque procedeu-se á distribuição do composto, tendo-se contabilizado o número de árvores por linha até gastar o totalidade de cada carga bem como o tempo gasto. Contabilizou-se ainda o tempo de carga.

2.4.1. Calibração da massa de compost distribuída por cada semi-reboque

2.4.1.1. Semi-reboque distribuidor IDavid

Efetuada a colocação das válvulas da Figura 7 na posição de abertura máxima, selecionada a combinação da caixa de velocidades do trator mais lenta, às 1500 rpm do motor procedeu-se á distribuição de composto.

Para avaliar a massa de composto distribuída ao solo colocaram-se panais perpendicularmente á linha de plantação (Figura 17) entre duas árvores consecutivas, tendo-se registado a massa de composto recolhida (Figura 18) em 3 pontos de amostragem.

Figura 17. Distribuição composto no panal

Figura 18. Aspeto do composto recolhido

2.4.1.2. Semi-reboque distribuidor Herculano

Efetuada a regulação das válvulas indicadas na Figura 14 na posição de abertura máxima, selecionou-se a combinação da caixa de velocidades do trator com a

rotação do motor para obter 540 rpm na tomada de força e distribuiu-se o composto nos dois lados da entrelinha do olival sobre panais previamente colocados no solo para determinar a massa distribuída (Figura 18).

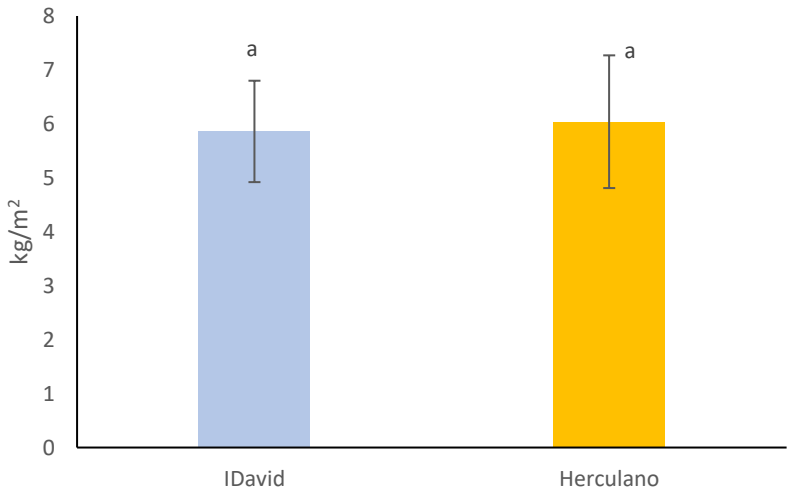
Figura 18. Posicionamento dos panais para recolha de composto

3. Resultados e discussão

3.1. Distribuição de composto

Os ensaios realizados mostraram que ambos os distribuidores conseguem efetuar a aplicação de uma camada uniforme de composto na linha dos olivais.

Na figura 19 mostra-se a quantidade de composto aplicada em média por cada semi-reboque ao solo numa faixa coincidente com a linha de plantação com cerca de 2,7m de largura (dimensão dos panais). Apesar de se tratarem de equipamentos com soluções distintas na forma de aplicação, não se verificaram diferenças significativas (P>0.05) na massa de composto aplicada (Tabela 1 – Apêndices).



Legenda: Colunas acompanhadas de letras iguais indicam ANOVA não revelou diferenças significativas (P>0.05)

Figura 19. Massa de composto aplicada no solo (kg/m^2) por cada semi-reboque (média±desvp)

Apesar do semi-reboque IDavid distribuir apenas para o lado direito, consegue garantir a colocação de composto numa faixa de solo idêntica de ambos os lados da linha de árvores, com uma única passagem de máquina em cada entrelinha.

Figura 20. Projeção do composto para lado oposto ao semi-reboque

O semi-reboque Herculano distribui para ambos os lados da entrelinha, numa faixa de aplicação no solo junto a cada linha de árvores com metade da largura da que se obtem com o semi-reboque IDavid, resultando numa única passagem do semi-reboque por cada entrelinha.

Este trabalho veio mostrar que é possível distribuir composto com o semi-reboque Herculano em olivais com entrelinhas de 5m para ambos os lados da entrelinha. Deste modo não é necessário alterar o sentido de rotação do sem-fim esquerdo para conduzir todo o material para o rotor de espalhamento do lado direito, conforme se verificou num ensaio prévio realizado no mesmo olival [4].

Em olivais com entrelinhas mais largas (6m) este procedimento é inevitável visto que este semi-reboque não consegue colocar o composto à direita e à esquerda na zona correspondente à projeção da copa.

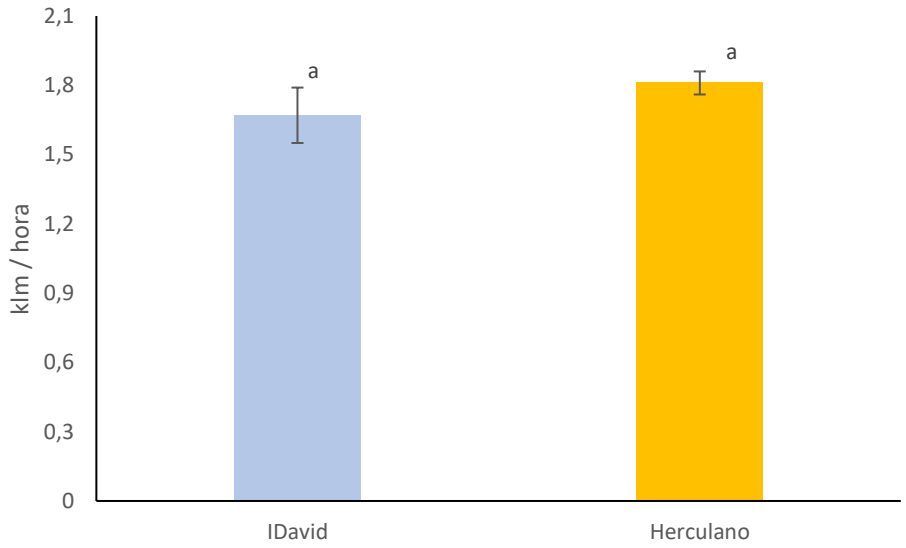
3.2. Velocidade de avanço

Na figura 21 mostra-se a velocidade de avanço na distribuição do composto com cada um dos semi-reboques distribuidores. Não se verificaram diferenças significativas (Tabela 2 – Apêndices) na velocidade de trabalho de cada um dos equipamentos ($P>0.05$), embora o semi-reboque Herculano tenha registado uma velocidade maior.

Tratam-se de velocidades de trabalho baixas, embora com valores superiores aos registados por Dias [4] noutro ensaio com o distribuidor Herculano. Nesse ensaio, no mesmo olival, a velocidade de avanço para garantir a aplicação de composto na faixa correspondente à linha de plantação com uma dose de cerca de 5kg/m^2, foi de cerca de 0.8km/hora.

A distribuição da mesma dose de composto num olival intensivo numa faixa de cerca de 4m de largura (2m de cada um dos lados da copa necessitou que o trator se deslocasse a cerca de 0.9km/hora (dados não publicados).

Esta situação deveu-se à necessidade de distribuir o composto apenas com o rotor de espalhamento do lado direito, o que obrigava a que o sem-fim do lado esquerdo estivesse a rodar em sentido inverso de modo a que todo o composto fosse conduzido para o lado direito. Deste modo foi necessário limitar a abertura da comporta, enquanto que neste ensaio como os sem-fim estavam a trabalhar no mesmo sentido foi possível aumentar ligeiramente a abertura da comporta visto que a dosagem foi de cerca de 6kg/m^2 enquanto que no ensaio de distribuição de composto à plantação tinha sido de 5kg/m^2.



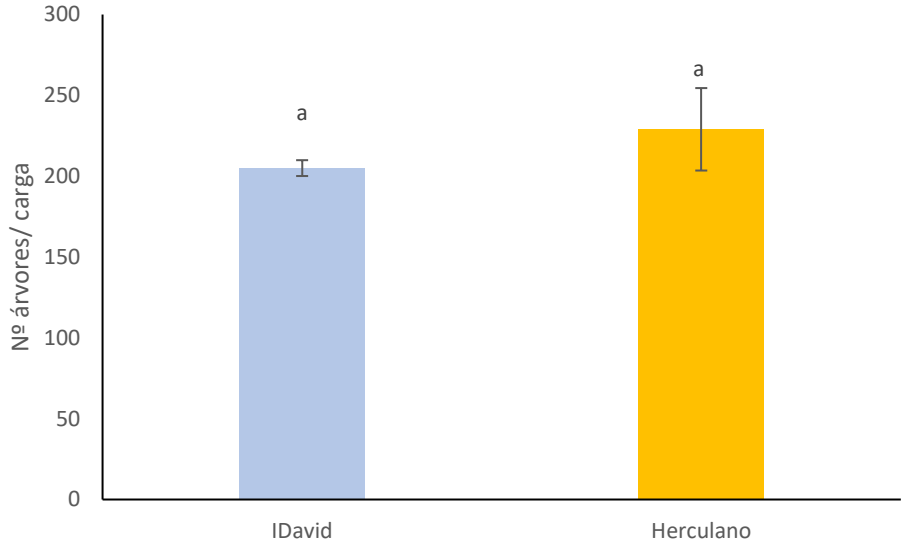
Legenda: Colunas acompanhadas de letras iguais indicam ANOVA não revelou diferenças significativas (P>0.05)

Figura 21. Velocidade de avanço (km/hora) na distribuição composto para cada semi-reboque (média±desvp)

3.3. Autonomia

Na figura 22 mostra-se o número de árvores onde se aplica composto com uma carga de cada semi-reboque distribuidor. De forma análoga ao que ocorreu na velocidade de avanço também não se verificaram diferenças significativas (P>0.05)

entre os dois semi-reboques na autonomia de cada carga (Tabela 3 – Apêndices), embora o semi-reboque Herculano tenha registado uma maior autonomia, apesar de ter um menor volume de caixa de carga.



Legenda: Colunas acompanhadas de letras iguais indicam ANOVA não revelou diferenças significativas (P>0.05)

Figura 22. Autonomia (árvores/carga) por carga composto (média±desvp)

Tal situação deve estar associada à maior irregularidade na alimentação dos sem-fim no semi-reboque Herculano, devido a uma menor largura da comporta de descarga. Tal leva a que por vezes existam momentos com quebra no fluxo de composto distribuído, porque este, ao ser empurrado para a frente pelo transportador de travessas tende a ficar comprimido no taipal dianteiro, criando-se um espaço vazio na base do transportador junto às travessas.

No caso do semi-reboque IDavid esta limitação não se evidenciou porque a comporta de descarga tem uma largura igual à caixa de carga.

De referir ainda que no semi-reboque Herculano os transportadores sem-fim por vezes bloqueiam com corpos estranhos como pedras, obrigando a inverter o sentido de rotação dos rotores, com a consequente irregularidade na distribuição.

As quebras no fluxo de composto distribuído pelo semi-reboque Herculano justificam a maior autonomia registada com este equipamento.

5. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que ambos os equipamentos permitem a aplicação de uma faixa uniforme de composto na projeção da sebe, com cerca de 5 a 6 kg/m^2.

O semi-reboque Herculano revelou maior sensibilidade à presença de corpos estranhos no composto, bem como irregularidade na distribuição.

A largura do sistema de distribuição do semi-reboque IDavid inviabiliza a sua utilização em olivais em sebe instalados com entrelinha de 3.75m a 4m, requerendo um redimensionamento do transportador transversal traseiro.

Este trabalho revelou ainda a necessidade distribuir os pontos de carga ao longo da parcela de olival como forma de minimizar os tempos não produtivos, nomeadamente o tempo de retorno vazio ao ponto de carga.

Para as dimensões das parcelas de olival em sebe existentes no Alentejo, a autonomia destes semi-reboques revela grandes limitações, obrigando a cargas frequentes, embora a largura da entrelinha destes olivais inviabilize a utilização de equipamentos com maior dimensão da caixa de carga.

Contribuição autores: "Conceptualização, A.B.D.; Metodologia, A.B.D. e I.L.D.; Software, I.L.D.; Validação, A.B.D., J.F. e V.C.; formal analysis, X.X.; Investigação,A.B.D. e I.L.D.; Recursos, J.F.; Curadoria dos dados, A.B.D.; Redação—preparação rascunho original, I.L.D.; Redação—revisão e edição, A.B.D.; Visualização, J.F.; Supervisão, A.B.D.; Administração projeto, V.C.; Aquisição financiamneto, V.C.. Todos os autores leram e concordam com a versão publicada do manuscrito."

Financiamento: Ao programa PRR do Ministério da Agricultura através do projeto InovCircolive - Inovação e Circularidade no Setor Oleícola (PRR-C05-i03-I-000208).

Agradecimentos: Ao aluno do mestrado em Engenharia Agronómica da Universidade de Évora António José Vieira pela colaboração nos trabalhos de campo.

Conflitos de interesse: Os autores declaração a inexistência de conflitos de interesse.

References

1. Sempiterno, C., Fernandes, R., Peça, J.O., Dias, A., Pinheiro, A., Saragoça, J., Pedra, F. (2022), Valorização agrícola de subprodutos do olival e do lagar- GO TECOLIVE, Actas Portuguesas de Horticultura nº 36, pp 153-162
2. Alexandre, C.A., Bajouco, R., Leal, J.D.S., Peça, J.O., Dias, A.B. Effects on Soil Chemical Properties and Carbon Stock Two Years after Compost Application in a Hedgerow Olive Grove. Agronomy 2023, 13, 1933. https://doi.org/10.3390/ agronomy13071933
3. https://www.inovcircolive.uevora.pt/
4. Dias, A.B., Pinheiro, A., Peça, J.O., Sempiterno, C., Fernandes, R., Falcão, J., Albardeiro,A. (2023), Avaliação de um espalhador de estrume na aplicação localizada de composto no olival, Actas do XXI Simposio Científico-Técnico Expoliva2023, Jaen, España.

Apêndices

Tabela 1 – Análise de variança para a massa de composto distribuída

Fonte variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	Valor P
Entre os grupos	0.047	1	0.047	0.039	0.853
Nos grupos	4.782	4	1.196		
Total	4.829	5			

Tabela 2 – Análise de variança para a velocidade de deslocamento na distribuição do composto

Fonte variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	Valor P
Entre os grupos	31901.042	1	31901.042	4.028	0.115
Nos grupos	31680.447	4	17920.112		
Total	63581.488	5			

Tabela 3 – Análise de variança para a autonomia na distribuição de composto

Fonte variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	Valor P
Entre os grupos	816.667	1	816.667	2.419	0.195
Nos grupos	1350.667	4	337.667		
Total	2167.333	5			

PARTE 6

REGA E DRENAGEM

RIEGO Y DRENAJE

Índice

Emisiones de CO2 y secuestro de carbono en las calles de una plantación de cítricos bajo distintas cubiertas dirigidas 530

Impacto agronómico, fisiológico y económico del riego sostenido con agua marina desalinizada en un cultivo joven de pomelo 544

Software SIGOPRAM para avaliação da fiabilidade hidráulica das redes de rega em pressão operando a pedido 554

Assessing Reservoir Inflows in an Ungauged Watershed: A Regionalization Approach Using the Temez Model 569

Assessing climate change impacts on maize cropping systems using a set of agroclimatic indicators 586

Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas en un oxisol del piedemonte llanero de Colombia 599

Determinación del contenido de agua para tres tipos de suelos por medio de un modelo de predicción 611

Eficiencia del contralavado en la eliminación de sólidos retenidos en filtros de arena en instalaciones de riego por goteo 623

Efecto del tipo de medio filtrante y del drenaje en el régimen de contralavado de filtros de arena presurizados 636

Los SIG como herramientas para la localización óptima de hidrantes multiusuario en redes de riego a presión 665

Cultivo de pimenta em sistemas sem solo: uso de fertirrigação e fertilizantes de liberação controlada 678

Efecto del acolchado sobre algunos parámetros del suelo y la producción de lechugas bajo riego por goteo 689

Riego Deficitario Optimizado para Volúmenes Limitados de agua y Cultivos Simultáneos. La metodología ORDILS 703

Desarrollo del gemelo digital de un pivote de riego en una plataforma SIG 714

Monitorização da qualidade da água em campos de produção de arroz (Oryza sativa L.) na Lezíria do Tejo 726

Zinc Biofortification and Irrigation in Mediterranean Vineyards: Effects on Photosynthetic Parameters 735

¿Cómo medimos en laboratorio la longitud máxima que puede tener una tubería emisora de riego localizado? 744

Estimación del coeficiente de cultivo dual del ajo en un entorno semiárido utilizando el modelo SIMDualKc 758

From research to practice: Simplifying and implementing the MOPECO model for efficient irrigation in annual crops 773

Plataforma Arduíno para Monitoramento da Irrigação no Cultivo do Tomateiro 783

Produção de Cravos de Corte em Resposta e Suplementação Hídrica por Acionamento Automático e Fertirrigação com Água Residuária de Bovinocultura 793

Aporte de Nitrogênio no Desenvolvimento de Aveia-Preta pela Aplicação do Efluente Tratado de Abatedouro 802

Distribuição hídrica e condutividade elétrica no bulbo úmido sob diferentes estratégias de irrigação em citros 810

Fertirrigação no cultivo da beterraba utilizando água residuária da bovinocultura leiteira 819

Fertirrigação de Rabanete com Biofertilizante Produzido na Unidade Piloto de Tratamento de Água Residuária de Bovinocultura de Leite 830

Effects of Nanobubble-Saturated Irrigation Solutions on Greenhouse Soil Properties in Almería (SE Spain) 841

Plataforma Arduíno para Monitoramento da Irrigação no Cultivo do Tomateiro 853

Produção de Cravos de Corte em Resposta e Suplementação Hídrica por Acionamento Automático e Fertirrigação com Água Residuária de Bovinocultura ... 863

Emisiones de CO2 y secuestro de carbono en las calles de una plantación de cítricos bajo distintas cubiertas dirigidas

V. Martínez-Alvarez[1,*], J.A. Acosta[1], A. Imbernón-Mulero[1], B. Gallego-Elvira[1], J.F. Maestre-Valero[1], S. Martínez-Martínez[1]

1 Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48, 30203, Cartagena, España.

* Correspondence: victoriano.martinez@upct.es

Abstract: Greenhouse gas emissions constitute a critical challenge, profoundly impacting our environment and the global climate. Agroecological ecosystems produce significant carbon dioxide fluxes; however, the equilibrium of their carbon sequestration, as well as emission rates, face considerable uncertainties. Sustainable cropping practices represent a unique opportunity for carbon sequestration, compensating greenhouse gas emissions. In this context, soils play a critical role in the global carbon cycle and are essential for mitigating climate change. This research evaluated the short-term effect of different management practices in alleys (tillage, no tillage, alley cropping with *Rosmarinus officinalis* and *Thymus hyemalis*) on soil properties, carbon sequestration, and CO_2 emissions in a grapefruit orchard under semiarid climate. For two years every four months, soil sampling campaigns were performed, soil CO_2 emissions were measured, and rhizosphere soils were sampled at the end of the experimental period. The results show that alley cropping with *Thymus* and *Rosmarinus* contributed to improve soil fertility, increasing soil organic carbon, total nitrogen, cation exchange capacity, and nutrients. The CO_2 emission rates followed the soil temperature/moisture pattern. Tillage did not contribute to higher overall CO_2 emissions, and there were no decreased soil organic carbon contents. In contrast, alley crops increased CO_2 emission rates, especially *Rosmarinus*; however, the bigger root system and biomass of *Rosmarinus* contributed to soil carbon sequestration at a greater rate than *Thymus*. Therefore, *Rosmarinus* is positioned as a better option than *Thymus* to be used as an alley crop, although long-term monitoring is required to evaluate if the reported short-term benefits are maintained over time.

Palabras clave: *Rosmarinus officinalis*; *Thymus hyemalis*, pomelo, gases de efecto invernadero, balance de carbono, cultivos intercalados, cubiertas vegetales.

1. Introducción

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) afectan al clima y al medio ambiente, por lo que su mitigación es un reto global. Los agrosistemas producen importantes flujos de CO2, que pueden verse condicionados por distintas actividades en la gestión del suelo. Los suelos desempeñan un papel fundamental en el ciclo del carbono, ya que cuando se gestionan de forma sostenible, contribuyen al secuestro de carbono, ayudando a reducir los niveles atmosféricos de CO2 y, consecuentemente, mitigando el cambio climático [1].

La bibliografía sobre la dinámica del carbono en el suelo y el cambio climático presenta resultados contradictorios en cuanto a la capacidad de las prácticas agrícolas para aumentar el secuestro de carbono en los suelos y reducir al mismo tiempo las emisiones de GEI [2]. Se ha demostrado que los sistemas agrícolas intensivos provocan mayores emisiones de GEI y una reducción de la materia orgánica del suelo (MOS) debido a la baja rotación de residuos, la falta de cobertura del suelo y el efecto del laboreo en la mineralización de la MOS [3]. Esta situación es característica en los cultivos leñosos mediterráneos, donde generalmente los árboles se riegan y las calles se mantienen desnudas mediante el laboreo o la aplicación de herbicidas para evitar la competencia por el agua y los nutrientes con las malas hierbas. En consecuencia, las tasas de erosión del suelo en dichos cultivos son elevadas, lo que tiene importantes implicaciones para la salud y sostenibilidad del suelo, como la elevada mineralización de la MOS y las emisiones de GEI, la pobre estructura del y bajo contenido en MOS y nutrientes, lo que conlleva una baja capacidad para retener agua y favorecer la infiltración [4].

La gestión sostenible de las tierras de cultivo tiene un alto potencial para mitigar el cambio climático, pero para ello es necesario un conocimiento profundo de la dinámica del carbono del suelo y de cómo la gestión agrícola y las variables ambientales afectan a la misma, siendo necesario promover prácticas de gestión agrícola sostenible que contribuyan al secuestro de carbono orgánico del suelo al tiempo que reducen las emisiones de GEI [5]. La incorporación de cubiertas en las calles de cultivos leñosos constituye un enfoque prometedor para combatir el cambio climático y la degradación del suelo, ya que secuestra carbono en el suelo al tiempo que protege el agua y la biodiversidad [6]. Además, el contribuye a reducir las emisiones de GEI, aumentar la productividad, mejorar la calidad del suelo y la capacidad de retención de agua, y atrae a polinizadores y fauna auxiliar [7]. De hecho, esta estrategia está en consonancia con el Pacto Verde Europeo [8] y la Ley Europea del Clima [9].

Hay que tener en cuenta que las plantas utilizadas en el cultivo de calles deben ser especies adaptadas a las condiciones edafoclimáticas de la zona, con el fin de que puedan desarrollarse de forma óptima. Además, deben ser compatibles con la maquinaria y las prácticas agrícolas del cultivo principal. En este sentido, el uso de especies aromáticas (*e.g. Hymus, Lavandula, Rosmarinus, Salvia, Helichrysum, Artemisia*, etc.) es una opción prometedora, ya que requiere un mantenimiento mínimo por parte del agricultor y podría obtener ingresos económicos además de los medioambientales, como su venta a la industria cosmética por sus aceites esenciales o como ingredientes para la industria alimentaria [10].

El objetivo principal de este estudio fue evaluar durante dos años el efecto de la implementación de diferentes prácticas de manejo en las calles de un huerto de cítricos (pomelo), bajo condiciones mediterráneas semiáridas, sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, el secuestro de carbono y las emisiones de CO_2. Las opciones de manejo consideradas fueron laboreo, no laboreo y cultivos dirigidos en calles de *Rosmarinus* y *Thymus*.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y diseño experimental

El área de estudio se localiza en la Región de Murcia, en el municipio de Torre Pacheco, en una finca comercial de pomelo (Figura 1). La zona tiene un clima mediterráneo semiárido, con veranos cálidos y secos e inviernos suaves, precipitación anual entre 250 y 300 mm, temperatura media anual entre 17 y 25 °C y una evapotranspiración de referencia de 1300 mm. Los suelos de la explotación son arcillosos y limosos, clasificados como Calcisoles háplicos.

La zona de estudio consta de 0,28 ha cultivadas, con árboles de pomelo 'Rio Red' injertados sobre portainjertos de macrophylla (*Citrus macrophylla*) con cinco años al inicio del experimento y un marco de plantación de 5,5 m × 3,5 m. El *Citrus macrophylla* se utiliza como portainjerto en cítricos en España debido a su tolerancia a suelos pobres y calcáreos, su resistencia a la sequía y su capacidad para promover un crecimiento vigoroso y una rápida producción de frutos de buen tamaño.

Se establecieron cuatro tratamientos diferentes en las calles de pomelo (Figura 1):

a) Laboreo convencional (2 veces al año a 20 cm de profundidad).
b) No laboreo.
c) Cubierta dirigida de tomillo (*Thymus hyemalis*).
d) Cubierta dirigida de romero (*Rosmarinus officinalis*).

El tomillo y el romero fueron seleccionados porque están adaptados a la aridez debido a sus hojas pequeñas y coriáceas, que minimizan la pérdida de agua. Ambas especies prosperan en suelos pobres y rocosos, comunes en la región mediterránea. De igual forma, soportan bien las altas temperaturas del verano mediterráneo y las ligeras heladas invernales. También tienen sistemas de raíces profundos que mejoran la estructura del suelo y ayudan a la retención de humedad, y al ser perennes y resistentes protegen los suelos contra la erosión.

El cultivo principal fue sometido a labranza convencional durante 12 años antes del ensayo. No se aplicaron pesticidas durante la duración del experimento.

Ocasionalmente, se regaron las calles diversificadas para asegurar el establecimiento adecuado de romero y tomillo.

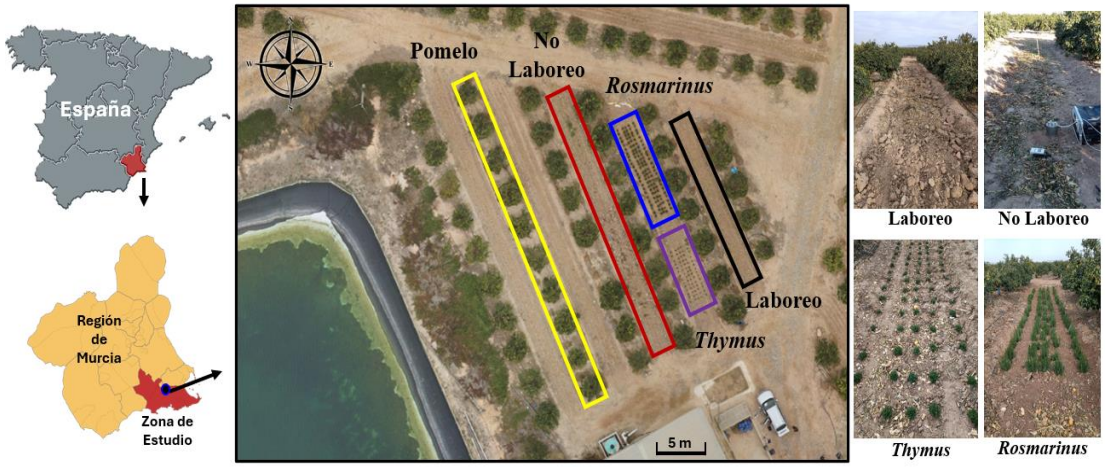


Figura 1. Localización del área de estudio y descripción espacial de los tratamientos.

2.2. Toma de muestras y análisis de laboratorio

Entre febrero-2023 y octubre-2024 se tomaron tres muestras de suelo cada 4 meses utilizando una barrena manual. Las muestras estaban compuestas de 3 submuestras aleatorias a una profundidad de 0 a 20 cm para cada tratamiento (laboreo, no laboreo, tomillo y romero) y para el cultivo principal (pomelo). Las muestras se secaron en laboratorio durante una semana y se tamizaron a 2 mm de diámetro de luz. El pH del suelo y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron en agua desionizada (1:2.5 y 1:5 p/v, respectivamente). Los porcentajes de arena, arcilla y limo se obtuvieron utilizando el método del hidrómetro de Bouyoucos. El carbono orgánico (OC), el C inorgánico (IC) y el nitrógeno total (TN) se determinaron mediante el análisis elemental (LECO CHNS). Los cationes solubles en agua (Ca, Mg, Na, K) y aniones (sulfatos, cloruros y nitratos) se extrajeron con agua desionizada y se midieron mediante cromatografía iónica para aniones (Dionex DX 500) y mediante espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente para cationes (ICP-MS, Agilent Technologies, Modelo 7900). La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se determinó según la metodología propuesta por Soil Survey Staff [11]. El fósforo biodisponible (P) se midió utilizando el método Olsen P, basado en la extracción con bicarbonato de sodio. Los micronutrientes biodisponibles (Zn, Fe, Cu y Mn) se determinaron utilizando DTPA (ácido dietilentriamina pentaacético) como extractante y tambien fueron medidos mediante espectrómetro de masas de plasma.

2.3. Medidas de dioxido de carbono en el suelo

Las mediciones de las emisiones de CO_2 del suelo se realizaron por triplicado cada 4 meses en todos los tratamientos desde febrero de 2023 a octubre de 2024, entre

las 9:00 y las 11:00h. Para la determinación de las emisiones de CO_2 se empleó una cámara de gas dinámica, la cual consta de una cámara fabricada en acero inoxidable, de 7.5 cm de diámetro y 20 cm de altura, conectada a un analizador multigas por espectroscopía fotoacústica infrarroja (GASERA One). Las cámaras se colocaron sobre una base de acero inoxidable, que se insertó aleatoriamente en el suelo a una profundidad de 15 cm en cada uno de los tratamientos. Para determinar las cantidades de CO_2 emitido (mg m^{-2} h^{-1}) se midieron las emisiones durante un período de 5 minutos para obtener una tendencia lineal de estas, tomando 2 medidas por muestra, una inicial (minuto 1) y una al final (minuto 5), de esta manera la diferencia entré la cuantificación de la primera medida y la medida final dividida por el tiempo transcurrido daría las emisiones medias totales de CO_2. Al mismo tiempo y en los mismos puntos de medida de emisiones de CO2 se registró la humedad y temperatura del suelo con una sonda portátil (Procheck C, Decagon 5TM).

2.4. Tratamiento estadístico

En primer lugar, se verificó la distribución normal de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov con $p<0,05$. La homocedasticidad se evaluó con la prueba de Levene y los datos se transformaron logarítmicamente cuando fue necesario. Para comparar el efecto de los diferentes tratamientos (labranza, labranza cero, romero, tomillo y pomelo) sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo (antes y después de los tratamientos), se aplicó tanto un análisis de la varianza unidireccional (ANOVA) como el test de Tukey (Honestly Significant difference, HSD) con $p<0,05$. Por su parte, tanto para identificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en las emisiones de CO_2 como para identificar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos y períodos de muestreo en la evolución de carbono inorgánico/orgánico y nitrógeno total del suelo también se aplicó tanto un análisis de la varianza (ANOVA) como el test de Tukey (Honestly Significant difference, HSD) con $p<0,05$. Finalmente, se utilizó la prueba de correlación de Spearman para examinar las relaciones entre el carbono inorgánico/orgánico y nitrógeno total del suelo y las tasas de emisión de CO_2.

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto del manejo de las calles en las propiedades fisicoquímicas del suelo

En la Tabla 1 se presentan las propiedades fisicoquímicas tanto de los suelos antes y después de los tratamientos como de los suelos rizosféricos de tomillo y romero, incluyendo: pH, CE, carbono orgánico e inorgánico, nitrógeno total, capacidad de

intercambio catiónico, textura y disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.

Tabla 1. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas del suelo pre y post-tratamiento. Los valores están expresados como promedio ± desviación estándar (ej., 8.2±0.1). Letras diferentes (a, b, c) indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

	Antes de los tratamientos		Después de los tratamientos						
						Rosmarinus officinalis		*Thymus hyemalis*	
	Pomelo	Calle	Pomelo	No labrado	Labrado	Soil	Suelo rizosférico	Soil	Suelo rizosférico
pH	7.8±0.2b	8.5±0c	8.3±0bc	8.2±0.1b	8.2±0b	8.2±0b	7.3±0.1a	8.4±0bc	7.3±0.1a
CE (dS/m)	0.8±0.1c	0.2±0a	0.2±0a	0.3±0ab	0.2±0ab	0.3±0ab	0.7±0.1c	0.4±0b	0.5±0.1b
Carbono inorgánico (%)	4,8±0,1	4,7±0,1	4,5±0	4,7±0	4,8±0	4,7±0,1	4,9±0	4,6±0,1	4,9±0
Carbono orgánico (%)	1,1±0,02	0,9±0,05	1,2±0,05	1±0,02	1±0,05	1,2±0,02	1,4±0,04	1,1±0,03	1,2±0,01
Nitrogeno total (%)	0,14±0	0,11±0	0,14±0,01	0,13±0,01	0,12±0	0,14±0,01	0,24±0,02	0,12±0,01	0,16±0,01
CIC (meq kg^{-1})	11.1±0.5ab	10.7±0.4a	12.8±0.2b	12.6±0.4ab	13.8±0.5b	14±0.5b	18.9±0.9c	10.8±0.9a	18.2±0.9c
Arcilla (%)	20.7±0.9	21.2±1.4	19.8±0.8	21.9±3.2	22.6±1.1	22.6±2.9	21.8±3	22±2.4	21±1.3
Limo (%)	18.3±0.7ab	24.6±1.7c	16.4±1.4a	22.9±2.6bc	21.7±2.1bc	21.2±1.4bc	20.4±0.9abc	20.2±1.7abc	18.4±1.1ab
Arena (%)	61.1±0.4bc	54.1±2.9a	63.8±1.3c	55.1±1.7ab	55.6±3.1ab	56.2±1.8ab	57.8±3.7abc	57.8±0.8abc	60.6±1.6bc
P disponible (mg kg^{-1})	96.9±7.8c	49.6±3.6ab	78.7±3c	47.3±6.1ab	39.6±3.6a	51.3±7.5ab	62±7b	48.5±3ab	57.8±3.3b
Fe disponible (mg kg^{-1})	3.82±0.5a	7.61±0.9ab	5.37±1a	7.15±0.7ab	7.41±1.1ab	7.76±1ab	9.41±1b	8.7±1b	13.98±1.5c
Mn disponible (mg kg^{-1})	8.63±0.9ab	8.69±1ab	8.77±1ab	8.13±1.6ab	10.91±1.3bc	8.66±1.1ab	8.87±0.9ab	7.41±1.1a	12.43±1.5c
Cu disponible (mg kg^{-1})	2.07±0.5	1.87±0.8	1.72±0.8	2.42±0.6	1.79±0.3	2.86±0.8	2.22±1.3	2.63±0.8	2.63±0.9
Zn disponible (mg kg^{-1})	2.76±0.8ab	2.92±0.6ab	1.65±0.9a	2.63±0.9ab	2.73±0.9ab	2.82±0.4ab	2.75±0.8ab	4.38±0.9b	2.86±0.8ab
Na disponible (mg kg^{-1})	142±14b	40±5a	53±6a	46±4a	52±4a	136±12b	390±40c	153±26b	267±30c
K disponible (mg kg^{-1})	217±25a	247±29ab	235±27ab	246±27ab	263±33ab	296±15b	292±31ab	267±32ab	249±22ab
Ca disponible (mg kg^{-1})	1650±131a	1634±107a	1613±165a	1958±126ab	2177±170b	2046±58ab	2534±176bc	1846±97ab	2812±185c
Mg disponible (mg kg^{-1})	211±9a	211±25a	235±9ab	244±32ab	243±27ab	300±22b	459±40c	274±15ab	288±22b
Na soluble (mg L^{-1})	81.2±5.1c	9.9±2.2a	10.1±2.4a	12.9±2.6a	10.9±1.9a	43.5±3.3bc	32.1±3.8b	37.8±2.4b	48.1±5.2c
K soluble (mg L^{-1})	20±2.6b	12.8±2.9ab	8.5±1.6a	13.6±2.9ab	9.3±1.9a	24.6±3.8c	11.6±1.9a	11.7±2.2a	14.2±3.4ab
Ca soluble (mg L^{-1})	52.2±3.5c	18±2.6ab	13.2±2.7a	29.1±3.2b	20.5±1.9ab	59.9±12.7c	23.4±2.7ab	21.6±2.1ab	40.1±5bc
W. soluble Mg (mg L^{-1})	10.4±1.8b	3.8±1a	3.1±1a	5.5±0.9a	3.4±1.1a	16.8±2.6c	4.2±0.7a	4.4±0.6a	10.9±1.5b
Cl soluble (mg L^{-1})	144±11.9c	41.9±3.7b	11.9±1.4a	17.4±3.3a	12.4±1.8a	41.5±3.8b	34.4±3.3b	9.8±1.4a	33.5±3b
SO_4 soluble (mg L^{-1})	61.1±2.5c	43.5±3.3b	8.6±1.8ab	15.7±2.8b	10.3±2ab	66±3.4c	37.6±5.5b	6.6±1.2a	91.8±4c
NO_3 soluble (mg L^{-1})	86.6±6.9c	18.6±4.6b	11.8±1.9ab	55.4±5.2c	16±3.7b	4.1±0.6a	15.7±2b	7±1.3ab	2.6±0.7a

En general, después del periodo de estudio, los valores de pH muestran una tendencia hacia una ligera reducción en suelos de la rizosfera del romero y tomillo (7.3), mientras que los suelos no rizosféricos se mantienen en un rango alcalino de alrededor de 8.2 a 8.4, respectivamente. De igual modo, se observó una reducción estadísticamente significativa en los suelos rizosféricos en comparación con los valores iniciales, los cuales ascendían a 7.8 en suelos de pomelo y 8.5 en suelos de las calles. Esto sugiere que los tratamientos tienden a estabilizar o reducir ligeramente la alcalinidad del suelo en la rizosfera, lo cual podría estar relacionado con procesos biológicos o la influencia de las raíces en la química del suelo.

El ligero aumento de la CE en la rizosfera de las plantaciones de tomillo (0,5 dSm^{-1},) y romero (0,7 dSm^{-1}), comparada con la CE en los suelos no rizosféricos de estas especies (0,4 y 0,3 dSm^{-1}, respectivamente) indicaría que los exudados radiculares y la actividad microbiana, estarían contribuyendo a la movilización de las sales solubles en esa zona del suelo. Por el contrario, los valores de CE en los suelos de pomelo muestran una disminución significativa, pasando de 0,8 dSm^{-1} a 0,2 dSm^{-1} lo que sugiere que los riegos realizados durante el periodo de estudio tienden a lavar las sales en el perfil del suelo. Por el contrario, la labranza de las calles no ha

supuesto ningún impacto en la CE de los suelos ya que esta se mantiene constante durante el periodo de estudio (0,2 dSm^{-1}).

En la Tabla 1 también se observa que el carbono inorgánico (CI) permaneció constante en todos los tratamientos, con ligeros aumentos en los suelos rizosféricos, aunque sin diferencias estadísticamente significativas entre los mismos, presentando valores elevados debido a la naturaleza de los materiales en los que se han desarrollados estos suelos. Por el contrario, el carbono orgánico (CO), que es la fracción del carbono que secuestra este elemento de una manera objetiva (se almacena en el suelo a través de la descomposición de plantas y microorganismos), mostró un incremento significativo en la rizosfera de tomillo y romero, pasando del 1% tanto en las calles con y sin laboreo al 1,4% en los suelos de romero, y al 1,2% en los de tomillo, lo que indica que existe una entrada de materia orgánica rica en carbono procedente de los cultivos de cobertura que aumenta el carbono orgánico del suelo rizosférico. Por su parte, el contenido de nitrógeno total (NT) se mantiene relativamente constante entre tratamientos, por lo que se puede afirmar que el nitrógeno liberado por la descomposición de la materia orgánica aportada está compensando el nitrógeno absorbido por la vegetación.

En cuanto a los nutrientes disponibles, cuando se compara el suelo rizosférico y no rizosférico de los dos cultivos de cobertura se puede observar (Tabla 1) que la rizosfera de romero redujo la concentración de K soluble (de 24,6 a 11,6 mg L^{-1}), Ca soluble (de 59,9 a 23,4 mg L^{-1}), Mg soluble (de 16,8 a 4,2 mg L^{-1}) y sulfatos (de 66 a 37,6 mg L^{-1}), lo cual puede deberse a la propia absorción de las raíces. Por el contrario, se incrementaron los contenidos de Na disponible (de 136 a 390 mg kg^{-1}), Mg disponible (de 300 a 459 mg kg^{-1}) y nitratos solubles (de 4,1 a 15,7 mg L^{-1}) producto posiblemente de la actividad microbiana y a la descomposición de la materia orgánica que libera nutrientes. Por su parte, la rizosfera del tomillo aumentó la concentración de Fe disponible (de 8,7 a 13,9 mg kg^{-1}), Mn disponible (de 7,4 a 12,4 mg kg^{-1}), Na disponible (de 153 a 267 mg kg^{-1}) y Ca disponible (de 1846 a 2812 mg kg^{-1}), así como la de Na soluble (de 37,8 a 48,1 mg L^{-1}), Mg soluble (de 4,4 a 10,9 mg L^{-1}), cloruros (de 9,8 a 33,5 mg L^{-1}) y sulfatos (de 6,6 a 91,8 mg L^{-1}), probablemente debido a la descomposición de residuos vegetales, que enriquece el suelo con macro y micronutrientes, y a los procesos de meteorización de los minerales del suelo.

Si comparamos los suelos no rizosféricos de ambos cultivos de cobertura entre sí, podemos observar que el romero tiene concentraciones más elevadas de nutrientes esenciales como K, Ca, Mg solubles en agua, sulfatos y cloruros que los observados para los suelos no rizosféricos de tomillo. De igual modo, se observaron mayores niveles de EC, CO, NT, y nitratos solubles en los suelos rizosféricos de romero que

en los de tomillo. Por el contrario, Fe, Mn, Mg disponibles y Na, Mg y nitratos solubles en agua fueron mayores en los suelos rizosféricos de tomillo.

3.2. Evolución de las emisiones de dióxido de carbono del suelo

La temperatura y humedad del suelo son parámetros fundamentales en el secuestro de carbono en el suelo ya que regulan la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica. Como se puede observar en la Figura 2 y la Tabla 2 se realizaron 6 mediciones de temperatura y humedad de suelo en cada uno de los tratamientos durante el periodo de estudio, muestreos que coincidieron con las diferentes estaciones y con las medidas de las emisiones de CO_2.

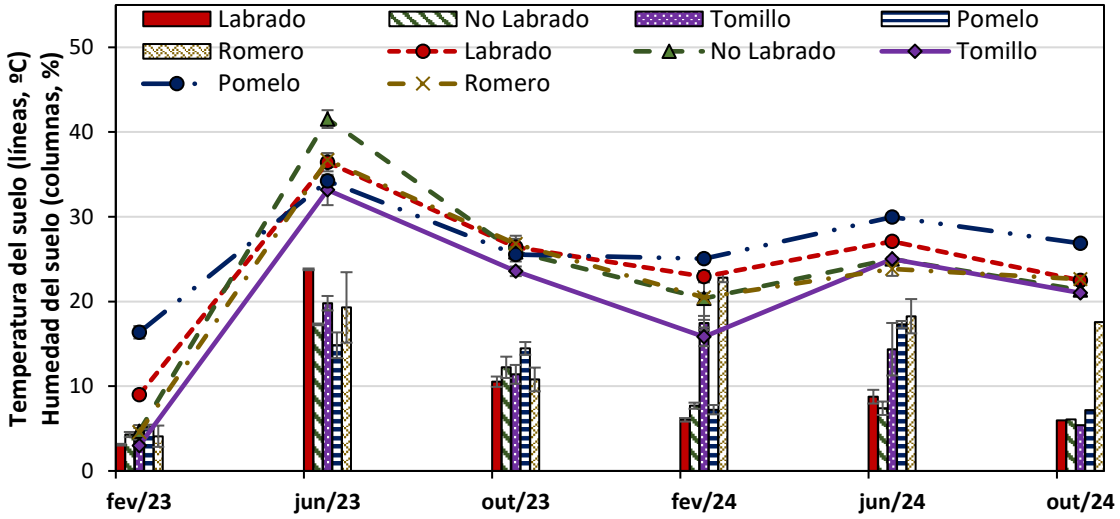


Figura 2. Relación de temperatura del suelo y humedad relativa en los diferentes tratamientos a lo largo del periodo de estudio.

Tabla 2. Análisis estadístico de los parámetros de humedad y temperatura del suelo. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas; ns: sin diferencias significativas ($p > 0.05$).

Periodo	Humedad del suelo					Temperatura del suelo				
	Labrado	No labrado	Tomillo	Romero	Pomelo	Labrado	No labrado	Tomillo	Romero	Pomelo
feb. 2023	a	a	a	a	b	c	b	a	a	d
jun. 2023	b	a	ab	ab	a	b	c	a	b	ab
oct. 2023	a	ab	a	a	b	ns	ns	ns	ns	ns
feb.2024	a	b	b	c	ab	bc	b	a	b	c
jun. 2024	a	a	b	b	b	c	b	b	a	d
oct. 2024	a	a	a	b	a	a	a	a	a	b

Como se puede observar (Figura 2), las temperaturas varían según la estación del año, encontrando las temperaturas más bajas en los meses de febrero coincidiendo con el invierno (3-16 °C) y las más altas en junio, inicio del verano (33-41 °C). A pesar de que la tendencia es semejante entre tratamientos en los distintos periodos de

medida, existen diferencias significativas en los mismos, siendo en general inferior en las calles plantadas con tomillo. La humedad del suelo también presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, cuyas variaciones se debieron al riego realizado en los pomelos, así como a las precipitaciones durante el período experimental, estando en todos los casos por debajo del 25% de la humedad volumétrica.

Temperaturas y niveles de humedad moderados favorecen el crecimiento de microorganismos y plantas, promoviendo la acumulación de carbono en el suelo. Sin embargo, temperaturas muy altas o humedad excesiva o insuficiente pueden acelerar la liberación de CO_2 o limitar la fijación de carbono. En la Figura 3 se presentan las emisiones de CO_2 durante el periodo de estudio, donde se puede observar que sigue la misma tendencia que la observada para la temperatura y humedad del suelo, con correlaciones positivas entre ambos parámetros (con la temperatura $r=0.636$ $p>0.05$, y con humedad $r=0.631$ $p>0.05$), mostrando la dependencia de las emisiones de CO_2 con estas variables. Además, se observa como las mayores emisiones coinciden con los meses de verano donde hay mayor actividad microbiana y radicular.

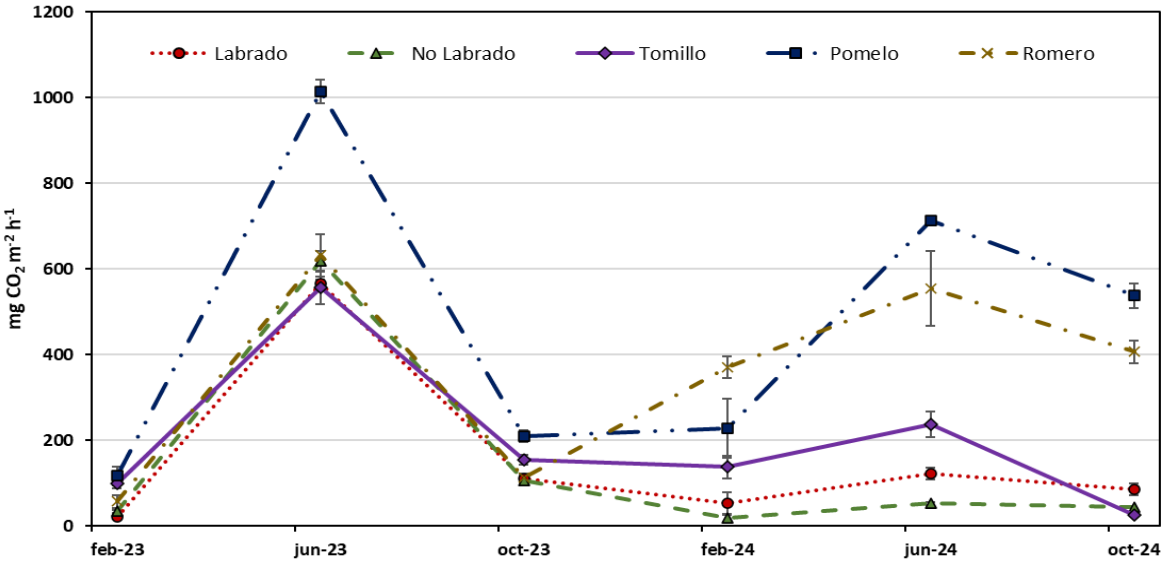


Figura 3. Emisiones de dióxido de carbono en los diferentes tratamientos a lo largo del periodo de estudio de 2 años.

Destacar que hay una evidente diferencia significativa entre el cultivo de pomelo y el resto de tratamientos (Figura 3 y Tabla 3), lo cual se debe a que los cítricos, al ser más grandes y longevos, presentan una mayor actividad radicular y respiración, además suelen aportar más hojarasca, ramas y raíces al suelo en comparación con los arbustos como los que estamos usando para este estudio, por lo tanto se aumenta la cantidad de materia orgánica, que al descomponerse libera CO_2 a través de la actividad microbiana.

Tabla 3. Análisis estadístico de los parámetros de humedad del suelo y temperatura. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos; ns: sin diferencias significativas ($p > 0.05$).

Periodo	Emisiones de Dióxido de Carbono				
	Labrado	No labrado	Tomillo	Romero	Pomelo
feb. 2023	a	a	b	a	b
jun. 2023	a	a	a	a	b
oct. 2023	a	a	b	a	c
feb.2024	ab	a	bc	d	c
jun. 2024	a	a	b	c	d
oct. 2024	a	a	a	b	c

También se puede visualizar (Figura 3 y Tabla 3) que las emisiones de CO_2 registradas en el tratamiento correspondiente al tomillo en el momento del último muestreo no presentaron diferencias significativas con los tratamientos de labranza y no labranza, lo cual se debe a que el cultivo de tomillo había sufrido un grave estrés hídrico durante el verano y su desarrollo se vio comprometido, reduciendo su actividad metabólica y, por lo tanto, la respiración de las raíces.

3.3. Secuestro de carbono en el suelo

En la Figura 4A se muestra la evolución del contenido en CI de los suelos en los distintos tratamientos. Como se puede observar los valores registrados se encuentran cerca del 5% en todos los tratamientos durante el periodo de estudio, donde no se observaron diferencias entre las calles plantadas con tomillo y romero. Por el contrario, se encontraron ligeras diferencias en el resto de los tratamientos, lo cual fue probablemente debido a la heterogeneidad del suelo, ya que el carbono inorgánico del suelo es un parámetro muy estable en las condiciones de la zona de estudio.

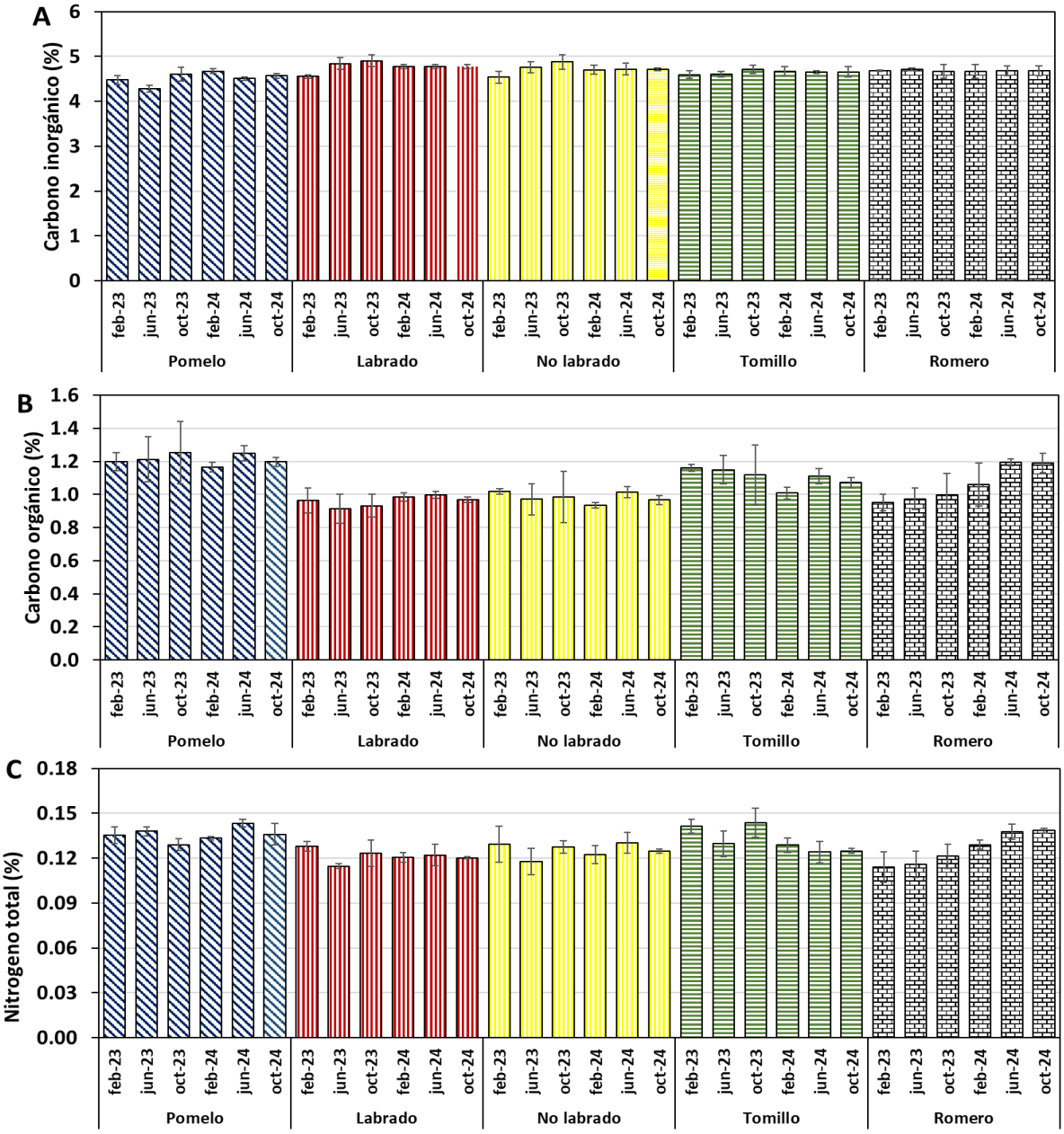


Figura 4. Cambios estacionales de carbono inorgánico (A), carbono orgánico (B) y nitrógeno total (C) en el suelo bajo diferentes tratamientos (laboreo, no laboreo, romillo, romero y pomelo).

Como se muestra en la Figura 4B, con respecto al CO del suelo, durante el periodo de estudio no se encontraron diferencias significativas en los tratamientos de las calles labradas y no labradas, manteniéndose los contenidos de CO en torno al 1% durante todo el año. No obstante, el no laboreo es una práctica agrícola en la que se evita remover el suelo, permitiendo que los residuos de cultivos permanezcan en la superficie, lo que ayuda al secuestro de carbono al reducir la exposición de la materia orgánica del suelo al oxígeno, lo cual disminuye la tasa de descomposición y permite que el carbono se acumule en el suelo de manera más estable. Además,

se favorece la formación de agregados estables que almacenan carbono a largo plazo, mejorando así la capacidad del suelo para capturar CO_2 atmosférico.

De igual modo, a pesar de que las emisiones de CO_2 fueron elevadas en los suelos de pomelo, el contenido de CO se mantuvo contaste en 1.2% durante el periodo estudiado, lo cual muestra que las emisiones de CO_2 se deben principalmente a la respiración del sistema radicular manteniendo el contenido de carbono orgánico en el suelo debido a la descomposición de hojas, raíces y otros residuos que enriquecen la materia orgánica del suelo. Además, los árboles crean condiciones favorables para la actividad microbiana y la formación de humus, así como para la retención de humedad, lo cual contribuye a la acumulación y estabilidad del carbono en el suelo.

Por el contrario, en las calles plantadas con tomillo y romero se observaron diferencias estadísticamente significativas a lo largo del tiempo (Figura 4B). En el caso del tomillo los contenidos se mantuvieron elevados entre febrero y octubre de 2023, siendo estos superiores tanto a las calles labradas como aquellas que no fueron labradas, pero sin tendencia a aumentar con el tiempo, observándose una ligera disminución en febrero 2024 seguido de un aumento entre junio y octubre 2024. Por el contrario, en el caso del romero, se observó una tendencia a aumentar el contenido de carbono orgánico del suelo con el tiempo, pasando de valores inferiores al 1% al inicio del ensayo a 1,2% al final de este. Esto puede deberse a que, según estudios realizado con plantas aromáticas sometidas a estrés hídrico, aunque ambas especies tienen requerimientos de agua bastante similares, ya que ambas son plantas mediterráneas adaptadas a condiciones de baja humedad y suelos bien drenados, el romero suele ser un poco más resistente a la sequía que el tomillo, lo que significa que tolera períodos secos ligeramente más largos [12], esto pudo ocasionar que el cultivo del romero siguiera su desarrollo aumentando significativamente el contenido de OC un año después de su plantación, tendencia que no se observó en las calles plantadas con tomillo.

De igual modo, se observaron diferencias significativas entre los suelos sin cobertura (con y sin laboreo) y los suelos con cubierta vegetal, los cuales aumentaron el contenido de CO del suelo (Figura 4B). Sin embargo, y como se ha comentado anteriormente, este incremento solo se mantuvo en el tiempo en el Romero, probablemente debido a su desarrollo más rápido y vigoroso, donde los restos de sus raíces y hojas representan aportes directos de carbono al suelo, especialmente en la superficie del suelo, que pueden descomponerse y transformarse en una fuente estable de materia orgánica. Hay que destacar que, aunque la concentración de CO en el suelo fue inferior al 1,2% al final del período

experimental, los valores aumentaron en un 20% en comparación con el valor inicial (Figura 4B).

En relación con el contenido de nitrógeno total (NT) (Figura 4B), no se encontraron diferencias significativas durante todo el período experimental para pomelo y las calles con y sin laboreo, manteniéndose los niveles de NT constantes en el tiempo en cada uno de estos tratamientos, con los valores más altos en los suelos de pomelo (0,14%). Por el contrario, se observaron diferencias significativas en las calles plantas con tomillo y romero, siguiendo una tendencia similar a la observada con el CO, donde se identificó un aumento en el caso del romero a lo largo del tiempo, mientras que en tomillo se produjo una ligera disminución, lo cual está estrechamente relacionado con el aporte de materia orgánica de los residuos de este cultivo.

4. Conclusiones

La implementación de cultivos de romero y tomillo en las calles de cítricos de clima mediterráneo contribuyó significativamente a la mejora de la fertilidad del suelo, especialmente en la rizosfera. Los suelos de las calles donde se cultivaron estas especies presentaron aumentos en el contenido de carbono orgánico del suelo, nitrógeno total y capacidad de intercambio catiónico, además de una mayor concentración de nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio, lo cual potencia su capacidad para mantener la fertilidad del suelo.

Los cultivos en las calles generaron tasas de emisión de CO_2 más altas en comparación con los suelos con laboreo y sin laboreo, especialmente en el caso del romero. Esto se atribuye al sistema de raíces más desarrollado de esta planta, que favorece una mayor actividad microbiana en su rizosfera. Sin embargo, se observa que las emisiones de CO_2 están positivamente correlacionadas con la temperatura y la humedad del suelo, lo que indica que estos factores ambientales son clave para regular las tasas de emisión.

A pesar de que el sistema de no laboreo no mostró diferencias significativas en las emisiones de CO_2 en comparación con el laboreo convencional, el uso de cultivos en las calles demostró beneficios adicionales en la captura de carbono, especialmente el romero, el cual aumentó el contenido de carbono orgánico en el suelo de manera más sostenida en el tiempo que el tomillo, debido a su mayor biomasa aérea y radicular, que le confiere una mayor capacidad de absorción de CO_2 atmosférico y de su incorporación en el suelo. Esto posiciona al romero como una opción más efectiva para la captura de carbono en sistemas de cultivos en las calles de cítricos bajo condiciones mediterráneas.

Contribución de cada autor: Conceptualization, A.I. and J.A.; methodology, J.A. and V.M.; software, B.G. and J.M.; formal analysis, B.G. and J.M.; investigation, A.I, S.M and J.A.; resources, V.M.; data curation, B.G. and J.M. writing—original draft preparation, J.A., S.M. and A.I.; writing—review and editing, B.G. and V.M.; visualization, A.I. and J.A.; supervision, J.A. and V.M.; project administration, V.M.; funding acquisition, V.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiación: Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Fundación Séneca con fondos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM). También se agradece el apoyo financiero de la Cátedra Trasvase y Sostenibilidad ─ Jose Manuel Claver Valderas.

Referencias

1. Gallego-Schmid, A.; Chen, H.M.; Sharmina, M.; Mendoza, J.M.F. Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment. J. Clean. Prod. 2020, 260, 121115.
2. Abbas, F.; Hammad, H.M.; Fahad, S.; Ishaq, W.; Farooque, A.I.; Bakhat, H.F.; Zia, Z.; Fahad, S.; Farhad, W.; Cerdá, A. A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. Agric. Ecosyst. Environ. 2020, 268, 110319.
3. Bot, A.; Benites, J. The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-Resistant Soiland Sustained Food Production; Food & Agriculture Organization: Rome, Italy, 2005.
4. Cerda, A.; Novara, A.; Moradi, E. Long-term non-sustainable soil erosion rates and soil compaction in drip-irrigated citrus plantation in Eastern Iberian Peninsula. Sci. Total Environ. 2021, 787, 147549.
5. Pe'Er, G.; Zinngrebe, Y.; Moreira, F.; Sirami, C.; Schindler, S.; Müller, R.; Bontzorlos, V.; Clough, D.; Bezák, P.; Bonn, A. A greener path for the EU Common Agricultural Policy. Science 2019, 365, 449–451.
6. Yang, H.; Zhang,W.; Li, L. Intercropping: Feed more people and build more sustainable agroecosystems. Front. Agric. Sci. Eng. 2021, 8, 373–386.J.
7. Rosa-Schleich, J.; Loos, J.; Mußhoff, O.; Tscharntke, T. Ecological-economic trade-offs of diversified farming systems-a review. Ecol. Econ. 2019, 160, 251–263.
8. European Commission. Communication from the Commission. The European Green Deal; COM(2019) 640 Final; European Commission: Brussels, Belgium, 2019.
9. European Commission. Regulation of the European Parliament and of the Council Establishing the Framework for Achieving Climate Commission: Brussels, Belgium, 2020
10. De Martino, L.; Nazzaro, F.; Mancini, E.; De Feo, V. Essential Oils from Mediterranean Aromatic Plants. The Mediterranean Diet: An Evidence-Based Approach; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 649–661.
11. Soil Survey Staff. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Version No. 4.0. USDA NRCS. Soil Survey Investigations Report No. 42; U.S. Government Publishing Office: Washington, DC, USA, 2004.
12. Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral, R., Pérez-Espinosa, A. (2010). The potential of Mediterranean aromatic plants for use in sustainable agriculture. Agronomy for Sustainable Development 18, 584-599.

Impacto agronómico, fisiológico y económico del riego sostenido con agua marina desalinizada en un cultivo joven de pomelo

A. Imbernón-Mulero[1], V. Martínez-Alvarez[1], J.A. Acosta[1], S. Martínez-Martínez[1], B. Gallego-Elvira[1], J. Navarro[2]; J.M. Robles[2], J.F. Maestre-Valero[1,*]

[1] Departamento de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 48. 30203, Cartagena, España. alberto.imbernon@edu.upct.es; ja.acosta@upct.es; silvia.martinez@upct.es; victoriano.martinez@upct.es; belen.gallego@upct.es

[2] Equipo de Riego y Fisiología del Estrés, Departamento de Bioeconomía, Agua y Medio Ambiente, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA), c/Mayor s/n, 30150 La Alberca, Murcia, España; josefam.navarro2@carm.es; juanm.robles@carm.es

* Correspondence: josef.maestre@upct.es

Abstract: La escasez de recursos hídricos para riego en áreas áridas y semiáridas, como el sureste de España, ha fomentado el uso de recursos hídricos no convencionales, entre los cuales, el agua de mar desalinizada (AMD), se ha convertido en la opción más prometedora para aliviar la escasez de recursos. Sin embargo, su uso complementario en el riego agrícola presenta algunos pros y contras que deben ser considerados. Entre otros, destacan los mayores costos asociados a su uso, su baja salinidad y la presencia de elementos potencialmente dañinos, en particular el boro. En este estudio, se evaluó la respuesta agro-fisiológica de un cultivo joven de pomelo al riego con AMD durante cuatro años consecutivos. Para ello se evaluaron cuatro tratamientos de riego: AMD, agua dulce (CR), una mezcla 1:1 de AMD y CR (AM), y AMD con concentración reducida de boro (AMD–B). Los resultados mostraron diferencias al comparar la calidad del agua de AMD con la de recursos convencionales de agua dulce. Además, el estudio determinó el posible riesgo de sodicidad del suelo, las diferencias no significativas en las relaciones hídricas de las hojas y la alta acumulación de boro en las hojas derivada del riego con AMD. Asimismo, una evaluación económica permitió analizar la rentabilidad de implementar total o parcialmente este recurso para el riego de cultivos de cítricos, considerando el costo del agua y los fertilizantes, así como los ingresos por la venta de la fruta. Los resultados proporcionan información y orientación sobre el riego de cultivos sensibles con AMD, con el objetivo de mitigar el posible daño al suelo y las plantas por la acumulación temprana de elementos fitotóxicos.

Keywords: recursos no convencionales, gestión del riego, sodicidad del suelo, acumulación de boro, productividad.

1. Introduction

En las últimas décadas, la escasez de recursos hídricos se ha convertido en una de las principales preocupaciones para los agricultores, especialmente en regiones áridas y semiáridas [1]. Un ejemplo destacado es la demarcación hidrográfica del

Segura (DHS), en el sureste de España, una de las zonas con mayor estrés hídrico de Europa, solo superada por Chipe y Grecia. Esta cuenca abarca más de 260.000 hectáreas de superficie de riego y enfrenta un déficit hídrico estructural superior a 281 hm^3. Esta escasez no solo amenaza la sostenibilidad de la agricultura, sino también la seguridad hídrica y el desarrollo económico de España [2].

En este contexto, los recursos hídricos no convencionales, como el agua salobre, el agua regenerada y el agua marina desalinizada (AMD), han surgido como posibles alternativas para el riego en áreas con limitaciones de agua. Su uso podría reducir la sobreexplotación de los recursos hídricos naturales y ofrecer estabilidad a los agricultores, siempre que se implementen prácticas agronómicas adecuadas. Desde 2005, la desalinización del agua de mar se ha promovido en España como una estrategia clave para asegurar el desarrollo socioeconómico y la producción de alimentos en regiones costeras con estrés hídrico. Sin embargo, su uso en la agricultura presenta tanto ventajas como desafíos [3].

Entre las ventajas, es una fuente de agua abundante, que puede ayudar a superar las limitaciones climáticas e hidrológicas. Además, su baja salinidad puede mejorar la productividad de los cultivos cuando sustituye aguas de menor calidad [4]. Estudios recientes indican que el riego exclusivo con AMD puede reducir el consumo total de agua hasta un 8,6% en cítricos y un 6,5% en hortalizas, aumentando el valor de la producción agrícola en un 21,3% y un 17,0%, respectivamente [2].

No obstante, el uso de AMD en la agricultura también presenta desafíos significativos. Su particular composición química se caracteriza por bajas concentraciones de nutrientes esenciales (calcio, magnesio y sulfato) y altos niveles de sodio (Na^+), cloro (Cl^-) y boro (B). Esto requiere ajustar los programas de fertilización para evitar impactos negativos en la productividad de los cultivos y en el medioambiente [2,4]. Las elevadas concentraciones de sodio, cloro y boro pueden provocar efectos fitotóxicos, en particular en cultivos leñosos sensibles como los cítricos. Por ejemplo, el umbral de toxicidad del boro en el agua de riego para cítricos es de 0,5 mg/L, mientras que los cultivos hortícolas pueden tolerar entre 1,0 y 4,0 mg/L [5]. Además, el alto contenido en sodio con relación al calcio está asociado con procesos de sodicidad y desestructuración del suelo. Esto destaca la importancia de una gestión precisa del agua de riego y de los fertilizantes según el tipo de cultivo y la calidad del agua utilizada.

En los últimos años, se han llevado a cabo investigaciones sobre el uso de aguas regeneradas y desaladas en cultivos hortícolas y leñosos, aunque aún hay incertidumbre sobre los efectos a largo plazo del AMD en la agricultura. La mayoría de los estudios se han centrado en la fertirrigación y en el rendimiento de los

cultivos [1,6], mientras que se dispone de menos información sobre sus impactos agronómicos y fisiológicos. Algunas investigaciones sugieren que el AMD no causa efectos fitotóxicos en árboles jóvenes de cítricos [7,8,9], aunque otros estudios señalan acumulaciones significativas de boro en las hojas tras tres años de riego continuo [10]. Factores como la edad de la planta, la concentración de sólidos disueltos y la temperatura del agua de riego pueden influir en la respuesta de los cultivos, lo que complica la comparación entre estudios y la formulación de conclusiones sólidas sobre el impacto del AMD en la agricultura [8].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las principales implicaciones agronómicas y económicas del riego sostenido con AMD en un huerto de pomelo. Durante cuatro campañas consecutivas, se han analizado los efectos del AMD en las relaciones hídricas de los árboles, la concentración de minerales en las hojas, la salinidad y sodicidad del suelo, y el rendimiento de los frutos. También se ha llevado a cabo un análisis económico centrado en el tipo de agua de riego y el consumo de fertilizantes. Este estudio asienta las bases de una investigación a largo plazo y podría proporcionar información clave sobre la gestión del AMD en regiones semiáridas con escasez de agua. Además, aporta datos valiosos sobre la respuesta temprana del cultivo de cítricos al riego contino con AMD, ayudando a optimizar la gestión del agua en los primeros años de cultivo.

2. Materiales and Métodos

2.1. Diseño experimental

El ensayo experimental se realizó en una finca comercial localizada en Torre Pacheco, Murcia, entre junio de 2019 y diciembre de 2023. El área se caracteriza por un clima semiárido, con veranos secos e inviernos suaves, con precipitaciones y evapotranspiraciones medias de 300 y 1400 mm, respectivamente. El cultivo consistió en 0,28 ha de pomelo (144 árboles de *Citrus x paradisi*, var. Río Rojo) injertados en un patrón de *Citrus macrophylla* de 5 años al inicio del ensayo (2019). La especie fue seleccionada por su gran relevancia en el sector citrícola del sureste español, así como por su especial sensibilidad a los excesos de boro y a la calidad del agua de riego.

En el estudio se emplearon dos fuentes de agua: (i) AMD proveniente de la planta desaladora de Escombreras (Cartagena, España) y (ii) como control, agua proveniente del Trasvase Tajo-Segura (CR). Ambos recursos fueron empleados de forma independiente y como mezcla a igual proporción (AM = 50% AMD + 50% CR). Por otro lado, y con el fin de evaluar los efectos de concentraciones reducidas de boro empleando AMD, se utilizó un sistema de ósmosis inversa (OI) para reducir el B en el AMD hasta valores entre 0,2 y 0,4 mg/L (AMD-B). De esta forma, las 0,28 ha

se dividieron en cuatro bloques de 36 árboles, asignando a cada uno un tratamiento de riego (AMD, AM, CR o AMD-B). La Tabla 1 resume sus principales características físico-químicas.

Tabla 1. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados durante el ensayo experimental y rangos de precio para cada recurso.

Agua de riego	Precio €/m³	pH	CE dS/m	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	B^{3+}
				mg/L							
AMD	0.85	9.0±0.2	0.9±0.1	174.0±47.6	2.7±2.1	-	16.4±8.7	39.0±21.2	10.0±7.2	117.4±34.8	1.1±0.2
AM	0.60	8.4±0.2	1.2±0.1	187.9±28.2	8.1±2.9	9.6±5.8	11.3±4.5	53.4±24.4	23.4±4.6	128.6±14.4	0.8±0.1
CR	0.35	7.8±0.3	1.4±0.1	202.7±33.9	9.5±2.4	15.4±6.3	9.1±3.4	70.4±10.3	43.8±6.6	140.3±14.1	0.5±0.1
AMD-B	1.18	9.5±0.1	0.3±0.1	25.9±6.4	2.1±1.5	-	10.5±1.3	7.9±6.6	3.1±1.0	32.9±19.3	0.3±0.2

*El precio varía a lo largo del ensayo según las variaciones establecidas por la planta desaladora de Escombreras.

La dosis de riego se calculó en base a la demanda evapotranspirativa del cultivo (ET_c), a partir de los datos de evapotranspiración de referencia (ET_0) obtenidos por una estación meteorológica cercana a la finca, perteneciente al Servicio de Información Agraria de la Región de Murcia (SIAM; estación TP-82). Por otro lado, independientemente del tipo de agua, todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de fertilizantes, aplicados mediante fertirriego (N, P_2O_5; K_2O, CaO, MgO, Cu, Fe; Tabla 2). Esto permitió analizar los posibles efectos de la implementación del AMD en el riego, los cuales podrían verse enmascarados si se ajusta el aporte nutritivo en base a la composición química de cada tipo de agua. Durante el ensayo experimental se emplearon fertilizantes complejos (N−P−K + Ca + Mg), aplicados de forma habitual por los agricultores de la zona.

Tabla 2. Requerimientos nutricionales de la especie Citrus x paradisi (var. Rio Rojo).

Año	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Cu	Fe
	kg/ha y año						
2019*	22.64	7.31	21.30	0.00	0.00	0.00	0.49
2020	41.71	7.32	18.66	12.06	5.17	0.00	0.41
2021	46.46	1.87	20.91	14.71	6.57	0.39	1.51
2022	144.92	17.04	79.55	41.66	9.16	0.64	2.08
2023	220.70	28.50	121.20	60.00	17.80	0.88	2.70

*Nótese que en 2019 solo fueron considerados los requerimientos desde junio hasta diciembre.

2.2. Determinaciones fisiológicas, agronómicas y económicas

Las diferentes aguas de riego se caracterizaron mensualmente desde el inicio del ensayo experimental, determinando el pH, la conductividad eléctrica (CE_a; dS/m), la concentración de aniones y cationes (Na^+, K^+, NH^{4+}, Ca^{2+} and Mg^{2+}, Cl^-, NO^{3-}, PO_4^{3-} y SO_4^{2-}; mg/L), el contenido de microelementos (B, Mn, Zn, Cu y Fe; µg/L), y la relación

de absorción de sodio (RAS_a; meq/L). Por otro lado, se tomaron muestras de suelo de cada tratamiento de riego tres veces al año (febrero, junio y octubre), a dos profundidades (0−25 cm y 25−50 cm) y a 30 cm de un gotero. De cada muestra de suelo se determinó el pH, la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_e), el contenido de iones solubles (Na^+, K^+, NH^{4+}, Ca^{2+} and Mg^{2+}, Cl^-, NO^{3-}, PO_4^{3-} y SO_4^{2-}), el contenido de microelementos (B, Mn, Zn, Cu y Fe), y la relación de absorción de sodio en el suelo (RASe).

Para el estudio fisiológico se monitorizaron principalmente (i) el potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) y potencial hídrico de la hoja madura (Ψ_{hoja}) y el potencial osmótico de la hoja de brotación de primavera (Π), (ii) el contenido de nutrientes en hojas maduras y de brotación de primavera, especialmente boro, y (iii) la cosecha y calidad de fruta, evaluando la cantidad de frutos por árbol, el rendimiento en kg totales por árbol y el peso de los frutos en cada tratamiento de riego.

Finalmente, se realizó un análisis económico mediante el cálculo de la diferencia entre los ingresos de cada campaña derivados de la venta de la fruta (0,27–0,28 €/kg) y el coste de fertirriego, que incluye el coste del agua de riego requerida para cada tratamiento y el coste de fertilizantes. Este valor se denominó resultado económico (RE).

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación agronómica y fisiológica

La Tabla 1 presenta la calidad del agua de riego utilizada, evidenciando notables diferencias entre los tratamientos. Destaca la disminución de la CE_a a medida que aumentó la proporción de AMD, alcanzando un valor mínimo en el tratamiento AMD-B debido al doble proceso de OI. Sin embargo, este tratamiento también mostró el pH más elevado (pH = 9,5), asociado a la adición de hidróxido sódico (NaOH) durante la OI, necesaria para reducir la concentración de boro por debajo de 0,4 mg/L cuando se opera a presiones relativamente bajas (≈ 9 bar).

El análisis de la relación entre la CE_a y la RAS_a indicó que el riego con diferentes proporciones de AMD (100% AMD, 50% AM y 100% AMD con boro reducido) podría generar un riesgo de sodificación del suelo a largo plazo. Este efecto podría mitigarse mediante la adición de Ca^{2+} y Mg^{2+}, que favorecerían el desplazamiento del Na^+ del complejo de intercambio del suelo. Dicha suplementación sería particularmente necesaria, dado que los tratamientos AMD y AMD-B presentaron bajas concentraciones de esos cationes debido a la intensa desmineralización provocada por la OI. En términos generales, los resultados subrayan la importancia de la monitorización tanto del agua de riego como el suelo para prevenir efectos

adversos del Na^+ y Cl^-, tales como colapso estructural, erosión y compactación, especialmente cuando el AMD se emplea como única fuente de riego [1,7].

Uno de los aspectos más relevantes del estudio es el posible impacto fitotóxico del boro. La concentración de este elemento en el suelo fue mayor en el tratamiento con AMD, como consecuencia de su mayor presencia en el agua de riego (Tabla 1). A medida que disminuyó la proporción de AMD sin tratar, la concentración de boro en el agua de riego y en el suelo también se redujo progresivamente (AM > CR > AMD-B) a lo largo de los cuatro años de estudio (datos no mostrados).

Esta tendencia también se observó en la acumulación de boro en hojas maduras y en brotes de primavera (Figura 1). En 2019 y 2020 la concentración de boro en las hojas maduras aumentó significativamente en verano (200–250 mg/kg) y comenzó a disminuir de forma progresiva en otoño (< 180 mg/kg). Esta variación se repitió en los años 2021, 2022 y 2023 alcanzando valores superiores a 300 mg/kg en julio de 2023. En estos meses el gran incremento de boro está relacionado con el aumento del aporte de agua durante la etapa de mayor demanda evapotranspirativa, así como con el incremento de la difusión de boro en las membranas de OI debido al incremento de temperatura del agua [9]. Por otro lado, su disminución en los meses de otoño se relacionó con la reducción del riego y la generación de nueva masa foliar por la brotación de finales de verano [8,9,10].

En las hojas de brotación de primavera, la concentración de boro aumentó de 50 mg/kg a mediados de primavera hasta 200 mg/kg a principios de invierno, mostrando variaciones significativas según el tratamiento de riego y su concentración en el agua de riego. No obstante, a pesar de estas concentraciones elevadas, los árboles no presentaron signos de fitotoxicidad. Esto podría atribuirse a su corta edad (4 años) y al vigor adquirido gracias al patrón *Citrus Macrophylla* (9 años en 2023) [8]. Sin embargo, es previsible que estos efectos se manifiesten en los próximos años, a medida que aumente la acumulación de boro en el suelo y en la planta, ya que la fitotoxicidad suele aparecer cuando las concentraciones foliares de boro superan los 300 mg/kg [5,10].

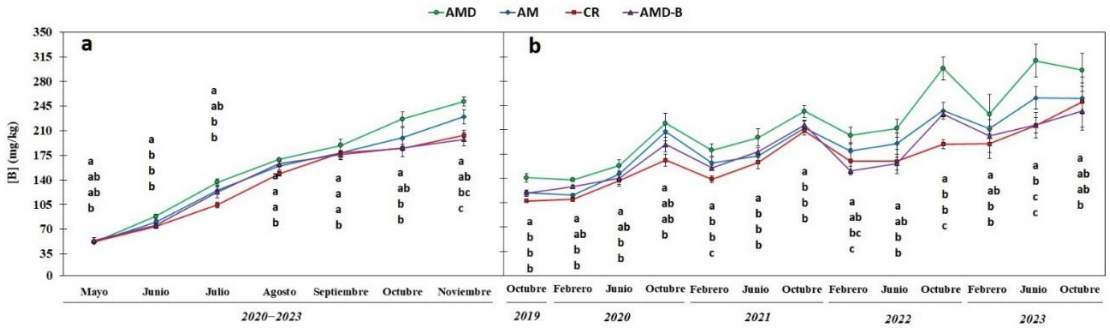


Figura 1. Evolución de la concentración de boro en la hoja de brotación de primavera en el periodo 2020-2023 (a) y en la hoja madura. Los valores del periodo 2020-2023 mostrados representan el promedio de la concentración de boro medida el mismo mes en los cuatro años de estudio. Las letras *a-c* y *ns* representan diferencias significativas y no significativas entre tratamientos, respectivamente, según la prueba HSD de Tukey ($p \leq 0,05$).

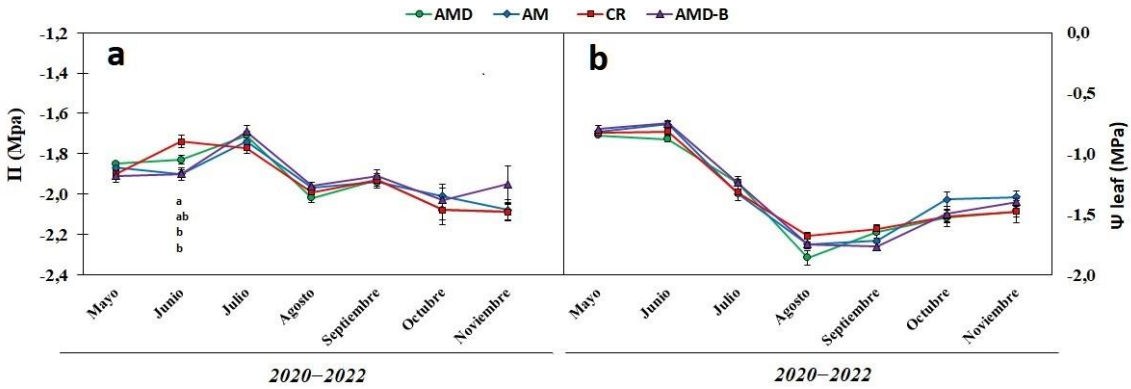


Figura 2. Evolución del potencial osmótico en la hoja de brotación de primavera (Π, a) y del potencial hídrico de la hoja (Ψ*hoja*, b) en el periodo 2020-2022. Los valores del periodo 2020-2022 mostrados representan el promedio de cada variable medida el mismo mes en los tres años de estudio. Las letras *a-c* y *ns* representan diferencias significativas y no significativas entre tratamientos, respectivamente, según la prueba HSD de Tukey ($p \leq 0,05$).

Respecto a otros parámetros fisiológicos, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en los potenciales hídricos y osmóticos (Figura 2a; b), así como en la producción de fruta, que se situó en torno a 70–80 kg/árbol en 2021 (2 años de edad), 97–104 kg/árbol en 2022 (3 años de edad) y 111–119 kg/árbol en 2023 (4 años de edad); valores normales acorde a las características agro-fisiológicas del cultivo.

3.2. Evaluación económica

El riego con AMD resultó 2,4 veces más costoso en comparación con el tratamiento CR (Figura 3), debido a la marcada diferencia en el precio del agua (Tabla 1). Además, la reducción de boro mediante el proceso de OI incrementó el coste de riego en aproximadamente un 40% respecto al riego con AMD.

Por otro lado, dado que no se ajustó el suministro de fertilizantes en función del contenido nutricional específico de cada tipo de agua riego, con el objetivo de evaluar de manera objetiva el impacto del uso de diferentes recursos hídricos, el coste de fertilización se mantuvo constante en los cuatro tratamientos. Sin embargo, es importante destacar la reciente y acelerada volatilidad de los precios de los fertilizantes, los cuales se han duplicados en los últimos tres años y se prevé que continúen en ascenso. Esta tendencia podría afectar negativamente la rentabilidad de los cultivos, especialmente cuando se incorporan fuentes de agua de alto coste, como el AMD (Tabla 1).

Tras el injerto realizado en 2019, los árboles permanecieron improductivos hasta enero de 2022, momento de la primera cosecha. Las notables diferencias en el coste del agua de riego entre los tratamientos han acentuado las variaciones en el rendimiento económico (RE) desde 2021, hasta 2023. No obstante, la elevada variabilidad observada en la cosecha enmascara, en algunos casos, el efecto del coste del agua sobre la rentabilidad del cultivo. Este efecto se prevé que disminuya a medida que el cultivo alcance el estado adulto y tanto los costes como las producciones se estabilicen.

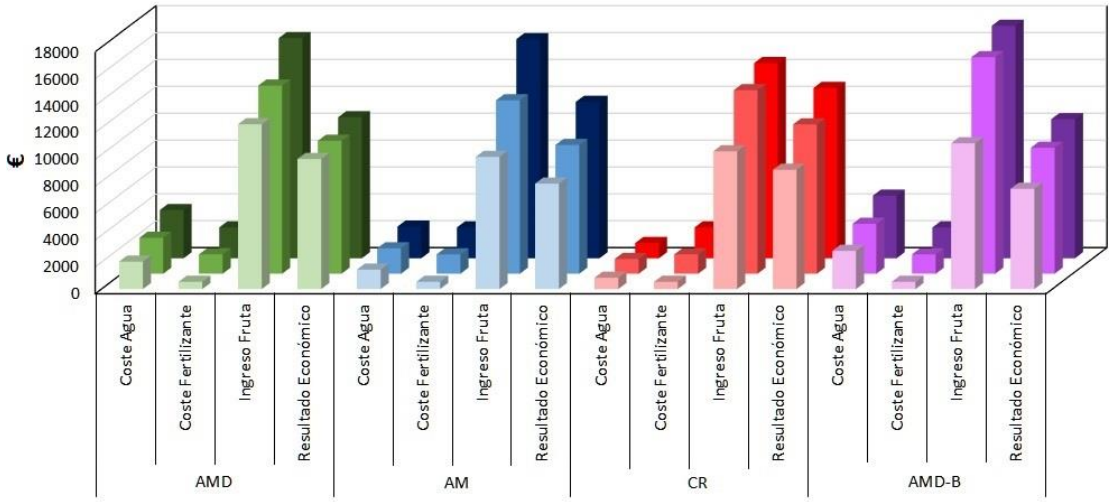


Figura 3. Costes de agua de riego, fertilizantes, ingresos derivados de la venta de la fruta y resultado económico que representa el margen bruto obtenido como la diferencia entre los ingresos y el coste de fertirriego, para cada tratamiento de riego. Las gamas de colores indican el año, para cada tratamiento y variable, desde un tono más claro (2021) y un tono intermedio (2022), hasta un tono oscuro (2023).

4. Conclusiones

Este estudio evaluó el impacto agronómico del riego con agua marina desalinizada (AMD) en el cultivo de árboles jóvenes de pomelo. El estudio identificó dos factores influyentes en el desarrollo del cultivo: el crecimiento acelerado por el injerto sobre un patrón de 5 años y, la falta de ajuste de la fertilización a cada tratamiento de riego.

Los resultados mostraron que las altas concentraciones de sodio en el riego con AMD aumentaron las relaciones sodio/calcio (Na^+/Ca^{2+}) y y sodio/magnesio (Na^+/Mg^{2+}), lo que podría provocar sodificación del suelo y competencia por nutrientes. No obstante, la baja conductividad del AMD podría mitigar estas deficiencias mediante la mayor suplementación de Ca^{2+} y Mg^{2+} a través de la fertirrigación. Además, los altos niveles de cloro (Cl^-) y boro (B) generaron acumulación en el suelo, especialmente en escenarios de riego exclusivo, planteando preocupaciones similares a las del Na^+.

A nivel fisiológico, las concentraciones de Na^+ y B alcanzaron umbrales de toxicidad en brotes de primavera y hojas viejas. Sin embargo, el desarrollo de las plantas y la productividad se mantuvieron estables, aunque con variabilidad entre árboles del mismo tratamiento. Aun así, no se descarta que la exposición prolongada a estos elementos pueda causar fitotoxicidad en el largo plazo. Desde una perspectiva económica, se observaron pequeñas diferencias en el contenido de nutrientes entre las fuentes de agua, siendo los tratamientos AMD y AMD con boro reducido (AMD-B) los más costosos y con mayor variabilidad en la cosecha, afectando especialmente el balance económico de 2021 y 2023.

En conclusión, los hallazgos destacan la importancia de realizar evaluaciones a largo plazo para prever efectos futuros, especialmente cuando el crecimiento de los árboles se estabiliza y pueden surgir diferencias en la productividad. Estos estudios son esenciales para determinar la viabilidad del AMD como fuente principal de riego en cultivos sensibles de zonas con escasez de recursos hídricos.

Contribución de los autores: Conceptualización, Imbernón-Mulero, A., Maestre-Valero, J.F., Navarro, J; Gestión de datos, Imbernón-Mulero, A., Martínez-Alvarez, V., Acosta, J.A., Martínez-Martínez, S., Robles, J.M.; Análisis formal, Imbernón-Mulero, A., Maestre-Valero, J.F., Navarro, J; Adquisición de financiación, Maestre-Valero, J.F., Gallego-Elvira, B; Investigación, todos los autores; Metodología, Imbernón-Mulero, A., Maestre-Valero, J.F., Navarro; Visualización, Imbernón-Mulero, A., Maestre-Valero, J.F., Navarro; Administración del proyecto, Maestre-Valero, J.F; Redacción – borrador original, Imbernón-Mulero, A., Navarro, J; Redacción – revisión & edición: todos los autores. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiación: La investigación y la APC han sido financiadas por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033, España) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE) en el marco del proyecto SEA4CROP (PID2020-118492RA-C22). Adicionalmente, este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT / ThinInAzul que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

Disponibilidad de datos: Los datos estarán disponibles previa solicitud.

Agradecimientos: Se agradece la colaboración de la Cátedra Trasvase y Sostenibilidad—Jose Manuel Claver Valderas.

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

References

1. Bar-Tal, A., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Schwartz, A., Faingold, I., Seligmann, R., 2017. Optimization of calcium and magnesium concentrations for fertigation of tomato with desalinated seawater. Isr. J. Plant Sci. 64, 80–91.
2. Martínez-Alvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination. 2023. 548, 116252.
3. Arahuetes, A., Hernández, M., Rico, A.M., 2018. Adaptation Strategies of the Hydrosocial Cycles in the Mediterranean Region. Water 10, 790.
4. Kaner, A., Tripler, E., Hadas, E., Ben-Gal, A., 2017. Feasibility of desalination as an alternative to irrigation with water high in salts. Desalination 416, 122–128.

5. Grattan, S.R., Diaz, F.J., Pedrero, F., Vivaldi, G.A., 2015. Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of Citrus spp.: Emphasis on boron and specific-ion interactions. Agric. Water Manag. 157, 48–58.
6. Silber, A., Israeli, Y., Elingold, I., Levi, M., Levkovtch, I., Russo, D., Assouline, S., 2015. Irrigation with desalinated water: a step toward increasing water saving and crop yields. Water Resour. Res. 51, 450–464.
7. Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., Jódar-Conesa, F.J., Acosta, J.A., Martin-Gorriz, B., Robles, J.M., Pérez-Pérez, J.G., Navarro, J.M. Short-Term Response of Young Mandarin Trees to Desalinated. Seawater Irrigation. Water. 2020. 12 (1), 159.
8. Navarro, J.M., Antolinos, V., Robles, J.M., Botía, P. Citrus Irrigation With Desalinated Seawater Under a Climate Change Scenario. Front. Plant Sci. 2022. 13, 909083.
9. Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Acosta, J.A., Antolinos, V., Robles, J.M., Navarro, J.M., Maestre-Valero, J.F. Irrigation of Young grapefruits with desalinated seawater: Agronomic and economic outcomes. Agric. Water Manag. 2024. 299, 108877.
10. Vera, A., Moreno, J.L., García, C., Nicolás, E., Bastida, F. Agro-physiological and soil microbial responses to desalinated seawater irrigation in two crops. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2023. 250, 114507.

Software SIGOPRAM para avaliação da fiabilidade hidráulica das redes de rega em pressão operando a pedido.

Maria João Calejo[1]*, Antónia Ferreira[2], Luís Boteta[3], Pedro Santos Fortes[4] e Maria do Rosário Cameira [2]*

[1] AQUALOGUS – Engenharia e Ambiente, Lda, Rua do Mar da China, n.º 1 - Esc 2.4, 1990-137 Lisboa, Portugal; mariacalejo@aqualogus.pt

[2] LEAF-Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food-Research Center, Associated Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal; roscameira@isa.ulisboa.pt

[3] Centro Operativo Tecnologia de Regadio (COTR), Quinta da Saúde, Apartado 354. 7801-904 Beja, Portugal; e-mail@e-mail.com

[4] Departamento de Sistemas de Información Geográfica de Aigües del Segarra Garrigues, S.A., Spain

* Correspondence: MJC mariacalejo@aqualogus.com; MRC roscameira@isa.ulisboa.pt;

Abstract: Foi desenvolvida uma ferramenta que assenta no software SIGOPRAM, parametrizado e testado para as condições do Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit (AHL), para avaliação das redes de rega pressurizadas operando a pedido. A ferramenta recorre a um conjunto de dados detalhado, incluindo informação geográfica e alfanumérica, que permite o diagnóstico que precede as medidas para reabilitação e/ou modernização. Atualmente, apenas 48% da área do AHL é regada, e, por isso, o desempenho hidráulico da rede é bom. Pela mesma razão, foram detetados excessos de pressão na maioria dos hidrantes (ou bocas de rega), evidenciando ineficiência energética do sistema. No entanto, prevê-se, a curto prazo, um aumento da área regada com a transição para culturas de maior exigência hídrica. Verifica-se que nos cenários futuros, poderá ocorrer um aumento de até 163% do atual caudal de ponta. No cenário com maior exigência, nove hidrantes apresentam défices de pressão. Desses, cinco não satisfazem os requisitos de pressão em mais de 97% dos regimes de escoamento gerados, enquanto os restantes quatro falham em menos de 15% dos regimes de escoamento. Estes resultados indicam que, com práticas agrícolas mais intensivas, determinados pontos da rede poderão não garantir a pressão mínima exigida, colocando em risco a fiabilidade hidráulica. A solução proposta procura alcançar um equilíbrio entre fiabilidade hidráulica e eficiência energética, permitindo ao sistema acomodar o aumento da procura de água sem incorrer em custos energéticos desnecessários. O software SIGOPRAM constitui, assim, um mecanismo essencial de apoio à decisão para a associação de regantes e projetistas, fornecendo uma base técnica sólida para a tomada de decisões fundamentadas.

Keywords: Fiabilidade dos hidrantes; Diferença relativa de pressão; Padrão cultural; Intensidade de regadio

1. Introdução

Em regiões caracterizadas pela escassez hídrica, a adoção de sistemas coletivos de adução e distribuição para rega é frequentemente a solução preconizada para otimizar o uso da água e minimizar conflitos entre utilizadores. Nos últimos anos, têm sido implementados numerosos processos de modernização destas redes, com o objetivo de melhorar a eficiência no uso da água [1]. No entanto, o aumento da eficiência hídrica e da flexibilidade operacional tem sido acompanhado por um acréscimo do consumo energético, colocando desafios significativos aos agricultores, gestores das associações de regantes e técnicos de rega [1-3].

Nas redes de distribuição pressurizadas com bombagem, o equilíbrio entre o desempenho hidráulico medido ao nível das bocas de rega e a eficiência hídrica e energética é crucial, uma vez que a otimização de um dos domínios pode comprometer o outro. De acordo com [4], a redução dos inputs energéticos pode, inadvertidamente, comprometer o desempenho hidráulico e afetar a fiabilidade do fornecimento de água aos utilizadores finais. O consumo energético das redes de distribuição pressurizadas depende do caudal e da pressão de funcionamento do sistema, sendo fortemente influenciado pela operação das estações de bombagem, pela topografia, pela necessidade de garantir uma pressão mínima nos hidrantes que assegure a aplicação adequada de água na parcela, bem como pelo traçado da rede de distribuição [5]. Os sistemas de rega pressurizados que operam a pedido caracterizam-se pela ocorrência de múltiplos regimes de escoamento, definidos pelas diferentes configurações de hidrantes em funcionamento simultâneo. Os hidrantes e bocas de rega constituem pontos críticos do sistema, com exigências energéticas específicas, em função da sua distância à estação de bombagem e/ou da sua cota altimétrica.

A influência dos diferentes regimes de escoamento na gama de pressões nos hidrantes exige uma análise apropriada do desempenho hidráulico do sistema para múltiplos cenários de operação [6, 7]. Os avanços na modelação hidráulica e energética têm contribuído significativamente para enfrentar os desafios associados à eficiência hídrica e à gestão da energia. A modelação de redes de distribuição de água está, contudo, sujeita a incertezas provenientes de vários fatores. De acordo com [8], a rugosidade das condutas e os caudais pedidos são os parâmetros mais incertos numa modelação hidráulica, uma vez que não são diretamente mensuráveis. Em particular, na simulação de redes antigas, é necessário ajustar a rugosidade das condutas para que as estimativas coincidam com as medições de campo (calibração).

Os modelos e softwares hidráulicos têm vindo a ser adaptados a diferentes tipos de redes de distribuição, incluindo as redes de rega, permitindo simulações em períodos alargados sob distintas condições de procura e apoiando a tomada de decisão em sistemas coletivos. É o caso do EPANET [9], COPAM [7] e SIGOPRAM [10]. Este último desenvolve-se a partir das funcionalidades dos anteriores, integrando-as numa plataforma SIG.

O presente estudo baseia-se em resultados prévios do projeto HubIS (PRIMA) [11], propondo uma ferramenta abrangente que integra o software SIGOPRAM. Em particular, pretendeu-se: (i) diagnosticar o desempenho atual da rede de distribuição; (ii) utilizar dados medidos de caudal e pressão para calibrar o modelo hidráulico; (iii) simular e analisar o comportamento hidráulico e energético do sistema para o cenário atual e para cenários futuros; (iv) identificar soluções com potencial para a poupança energética.

2. Materiais e Métodos

2.1. O aproveitamento hidroagrícola do Lucefecit

O Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit (AHL) localiza-se no Alentejo, inserido na região hidrográfica do Guadiana, servindo uma área de 1 175 hectares. A gestão da distribuição de água aos agricultores, bem como a manutenção das infraestruturas, está a cargo da Associação de Beneficiários do Lucefecit (ABL). A água para rega provém da albufeira do Lucefecit (com uma capacidade útil de 9 625 000 m³). Parte da água armazenada é bombeada diretamente para a rede de distribuição pressurizada, que serve 964 ha.

A rede de distribuição pressurizada consiste numa rede ramificada enterrada com um comprimento total de 36 km. As condutas com diâmetros nominais (DN) de 800 a 400 mm são em fibrocimento, enquanto as condutas com DN entre 110 e 400 mm são em policloreto de vinilo (PVC). Esta rede abastece um total de 107 hidrantes, com caudais nominais entre 10 e 280 $m^3\ h^{-1}$. Cada hidrante pode dispor de 1 a 4 saídas, perfazendo 204 boca de rega. Cada boca de rega está equipada com contador de volume, limitador de caudal e válvula de controlo de pressão [12].

As cotas altimétricas dos hidrantes variam entre 165 e 220 m acima do nível médio do mar (a.n.m.). O AHL possui uma estação elevatória principal, PS1, localizada a montante da rede (cota = 113,9 m a.n.m.), dimensionada para um caudal de projeto Q_0 = 1 153 L s^{-1} e para operar a pedido. No dimensionamento hidráulico, foi considerado um regime de escoamento único, determinado com recurso à primeira fórmula de Clément [13], e assumida uma cota piezométrica a montante Z_0 = 260 m.

A PS1 dispõe de seis bombas de elevação (quatro de 400 kW e duas de 160 kW), das quais duas estão equipadas com variadores de velocidade. O nível da água na albufeira varia entre os 175 m (nível mínimo de exploração) e os 182 m (nível máximo de armazenamento). Dois reservatórios hidropneumáticos são utilizados para controlar os ciclos de bombagem e proteger a estação elevatória e a rede de rega contra o golpe de aríete. Existe ainda uma estação sobrepressora (PS2, cota = 281 m a.n.m.), que abastece 14 hidrantes localizados num troço terminal da rede, de forma a garantir a pressão de projeto de 400 kPa. O caudal fornecido por esta estação representa cerca de 14% do caudal total [12].

2.2. Dados primários: caudal e pressão

O Quadro 1 resume os dados recolhidos para a realização do presente estudo e as respetivas fontes.

Atualmente, o AHL não dispõe de um sistema de telemetria que permita a medição contínua e distribuída espacialmente de caudal e pressão. Assim, no âmbito do projeto HubIS, foram instalados dois pontos de monitorização. O primeiro localizado a jusante da estação elevatória principal (PS1), equipado com um sensor portátil de caudal ultrassónico Minisonic-P (precisão de 0,5%) e com um sensor de pressão PA-1 manómetro 0–10 bar (precisão de 1%), com transmissão de dados. As medições contínuas realizaram-se em três períodos durante a campanha de rega de 2022: maio/junho, julho/agosto (período de maior procura de água) e setembro/outubro. O segundo ponto de monitorização foi instalado num troço da conduta de distribuição a jusante da estação sobrepressora (PS2), onde foi instalado o mesmo tipo de sensor de pressão utilizado em PS1, com recolha de dados entre agosto e outubro.

Adicionalmente, com base na metodologia descrita em [11], foi recolhida informação sobre as perceções e opiniões dos interessados (*stakeholders*) relativamente às problemáticas e riscos associados à água e à energia, tanto no presente como em perspetiva futura.

Quadro 1. Dados utilizados no estudo e respetivas fontes

Dados	Fonte	Objetivo
Clima: Valores diários de temperatura máxima e mínima, humidade relativa, radiação solar, vento e precipitação	Estação meteorológica Vigia 38º38'59.28" N; 7º32'52.82" O	Evapotranspiração de referência
Culturas:		
Padrões culturais, fases fenológicas	Imagens Sentinel-2, Google Earth Satellite [14]	NDVI - identificação do início das fases do ciclo

Coeficientes culturais, prof. Radical	[15], [16-18]	Evapotranspiração cultural
Solos: capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica	Mapa de solos e de capacidade de uso (Ministério Agricultura)	Balanço hídrico do solo
Rega na parcela: calendário de rega, Sistema de rega	Associação de regantes do Lucefecit, observações *in situ*	Necessidades de rega
Topografia	Instituto Português do exército	Modelo digital do terreno
Aproveitamento hidroagrícola: Informação geográfica, fronteiras das parcelas e identificação	Ministério da Agricultura	Implementação da rede de rega no ArcMap/SIGOPRAM
Informação sobre as condutas (material, comprimento e diâmetro)	Projeto original	
Informação geográfica sobre hidrantes e bocas de rega	Associação de regantes do Lucefecit	
Estações de bombagem	Projeto original	
Condições de operação da rede	Medições *in situ*	Calibração e validação
Cenários futuros: intensidades de regadio e padrões culturais	Co-desenho durante a aproximação participatória	Avaliação desempenho AHL

2.3. Estrutura metodológica

2.3.1. Implementação do Sistema de Rega Coletiva do Lucefecit no SIGOPRAM

A primeira fase de modelação foi dedicada à implementação da rede do AHL no software SIGOPRAM. As camadas de um projeto SIGOPRAM relevantes para este trabalho incluem: a camada das parcelas agrícolas, os arcos (informação das condutas), os nós (ligações entre condutas, reservatórios, hidrantes e bocas de rega) e o modelo digital do terreno (MDT). Estas camadas possibilitam a implementação do modelo hidráulico e são fundamentais na análise da rede de rega. A informação geográfica e alfanumérica utilizada para implementar estas camadas e inicializar as simulações, bem como as respetivas fontes, encontram-se listadas no Quadro 1. A Figura 1 resume as etapas de implementação do AHL no SIGOPRAM/ArcMap.

2.3.2. Parametrização e simulação do cenário atual

Na segunda fase de modelação, o software foi primeiramente parametrizado para o cenário atual (campanha de rega de 2022). Os *stakeholders* descreveram tendências nas práticas de rega (dias da semana e períodos diários preferenciais para rega, duração das regas, entre outros), complementando a informação já existente. Esta etapa permitiu ajustar a procura de caudal a montante da rede e parametrizar o coeficiente de utilização na primeira fórmula de Clément.

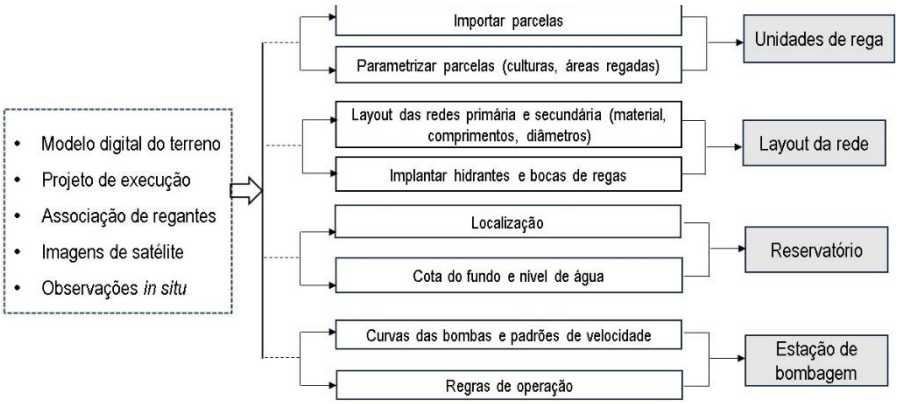


Figura 1. Implementação da rede de distribuição no software SIGOPRAM/ArcMap (adaptado de [19]).

O modelo hidráulico foi, de seguida, calibrado utilizando a rugosidade absoluta das condutas como principal parâmetro. As medições de pressão obtidas nos dois pontos de monitorização serviram como variáveis de controlo para o processo de calibração. Numa rede de distribuição, o caudal que circula nas condutas depende do número de bocas de rega abertas e da sua localização (configuração do sistema), bem como do caudal correspondente (regime de escoamento). No presente estudo, as configurações do sistema foram geradas a partir de um padrão de procura estocástico, definido com base na probabilidade de Clément. Foram realizadas mil simulações para recolher um conjunto de valores de caudal e pressão correspondentes a 1000 configurações de hidrantes. Estes resultados foram comparados com os valores medidos de caudal e pressão à cabeça da rede, de forma a estabelecer as condições de fronteira.

A rugosidade absoluta das condutas, utilizada na equação de Darcy-Weisbach para o cálculo das perdas de carga por atrito, foi inicialmente definida com valores típicos de 0,0036 mm para PVC, 0,3 mm para ferro fundido e 0,015 mm para fibrocimento [7, 19]. Devido à antiguidade da rede, foi utilizado um procedimento iterativo por tentativa e erro para obter valores representativos da rugosidade de uma rede com 40 anos de operação. Os valores foram progressivamente aumentados até que a gama de pressões simuladas no ponto de monitorização 2 coincidisse com a gama de pressões observadas. Após a calibração, o software foi utilizado para avaliar o desempenho hidráulico e energético da rede no cenário atual.

2.3.3. Análise hidráulica e energética

A análise incluiu os regimes de escoamento (número de bocas em funcionamento × caudal em cada uma), a curva característica da rede, os indicadores de desempenho ao nível dos hidrantes/bocas de rega e o desempenho energético. Os indicadores de desempenho diferença relativa de pressão (DRP) e fiabilidade (F) foram determinados para 1000 configurações de bocas de rega [7,12].

2.3.4. Cenários futuros

A fase seguinte da modelação consistiu numa análise de cenários, utilizando a ferramenta já calibrada e testada para o cenário atual. Os cenários futuros foram então simulados e os indicadores de desempenho calculados.

3. Resultados

3.1. Monitorização da rede: caudal e pressão

A análise dos dados de monitorização da rede permitiu obter informações fundamentais sobre o desempenho hidráulico da rede de distribuição de água em pressão durante a campanha de rega de 2022.

A Figura 2a apresenta a relação entre a pressão e o caudal no primeiro ponto de controlo, a jusante da estação elevatória principal (PS1). Os dados mostram que o caudal máximo é 430 L s^{-1}, o que corresponde apenas a 37% do caudal de projeto, fixado em 1 153 L s^{-1}. Esta discrepância deve-se, provavelmente, à baixa intensidade de rega (relação entre área regada e área beneficiada), que foi de 48% durante a campanha de 2022.

A pressão medida neste ponto mantém-se relativamente estável ao longo do tempo, mas situa-se ligeiramente abaixo do valor de projeto, 944 kPa. Observam-se flutuações sobretudo no início e no final da campanha de rega, indicando alguma instabilidade no funcionamento das bombas nestes períodos. Os dados sugerem que pressões baixas associadas a caudais reduzidos poderão ocorrer quando os agricultores regam enquanto as bombas se encontram desligadas, situação detetável entre as 18h00 de 25 de maio e as 08h00 do dia seguinte (Figura 4). Por outro lado, pressões elevadas a baixos caudais indicam que os grupos de bombagem estão a gerar pressões superiores às necessárias para os caudais em causa.

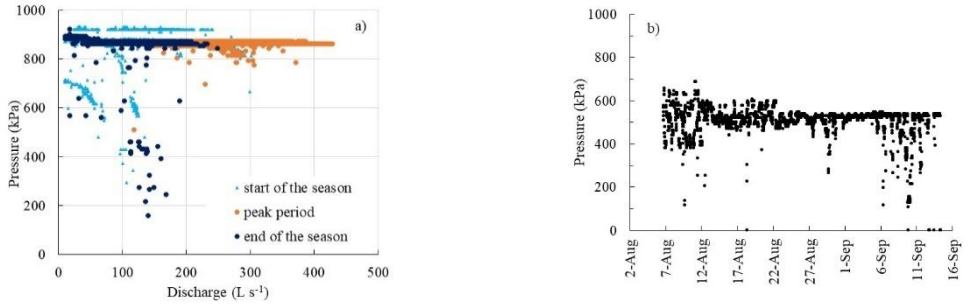


Figura 2. Resultados da monitorização durante a campanha de rega de 2022: a) caudal e pressão medidos a jusante da estação elevatória principal; b) pressão medida na rede de distribuição a jusante da estação elevatória secundária.

As medições de pressão a jusante da estação sobrepressora (PS2), apresentadas na Figura 2b, mostram uma pressão média de 510 kPa entre o início de agosto e meados de setembro, com um valor máximo de 686 kPa. No cenário atual, a estação elevatória secundária não entrou em funcionamento, por decisão dos técnicos da associação de regantes, que consideraram desnecessária a pressão adicional, face à reduzida relação entre área regada e área beneficiada.

A Figura 3 apresenta uma análise das medições instantâneas de pressão e caudal a jusante da PS1 durante a campanha de rega de 2022. Observam-se caudais elevados tanto de dia como de noite, variando entre 150 L s^{-1} e 430 L s^{-1}. Este padrão sugere que os agricultores com sistemas automatizados, como rampas pivotantes ou rega gota-a-gota, tendem a regar de forma contínua. Em contraste, nas zonas de minifúndio, onde predominam sistemas de aspersão não automatizados, a rega é limitada ao período diurno.

Figura 3. Medições de pressão, caudal a jusante da estação elevatória principal (PS1) durante a campanha de rega de 2022.

3.2. Modelação do cenário atual

3.2.1. Padrão de rega

O Quadro 2 apresenta a área ocupada e as necessidades de rega estimadas para cada cultura no mês de julho (período de ponta), bem como o caudal fictício contínuo (qfc) da rede de rega. De acordo com a informação fornecida pela ABL o número de horas diárias disponíveis para rega é de 22 horas, sendo que a rega é possível sete dias por semana. Este regime permite que os agricultores com sistemas modernizados (por exemplo, rampas pivotantes e rega gota-a-gota) realizem a rega também durante a noite, originando hidrograma de procura suavizado, com picos pouco acentuados — o que é confirmado pelos resultados da monitorização dos caudais. Um comportamento semelhante é descrito por [21] para o AHL em anos anteriores. Assim, o coeficiente de utilização da rede na 1ª fórmula de Clément foi parametrizado com o valor 0,9 (22/24).

Quadro 2. Área de cada cultura, necessidades de rega (NR) em julho 2022 e respetivo caudal fictício contínuo (qfc)

Cultura	**Milho**	**Olival**	**Vinha**	**Forrageiras**	**Melão**	**Outros hortícolas**
Área (ha)	166	193	18	43	33	4
NR (m^3 ha^{-1})	2686	669	684	1557	1944	1844
qfc (L s^{-1} ha^{-1})	1.036	0.258	0.264	0.601	0.75	0.711

3.2.2. Caudal e pressão

Os regimes simulados foram comparados com as medições de pressão e caudal realizadas durante a campanha de rega, a jusante da estação elevatória principal, ou seja, na entrada da rede de distribuição de água (Figura 3a). A simulação mostra uma boa correspondência com a tendência central dos dados medidos, sendo que a gama de variabilidade dos caudais é semelhante em ambos os conjuntos de dados. Relativamente à altura piezométrica (Figura 3b), embora o intervalo interquartil dos valores observados seja mais estreito em comparação com os valores simulados, estes últimos representam de forma adequada a pressão disponível no início da rede.

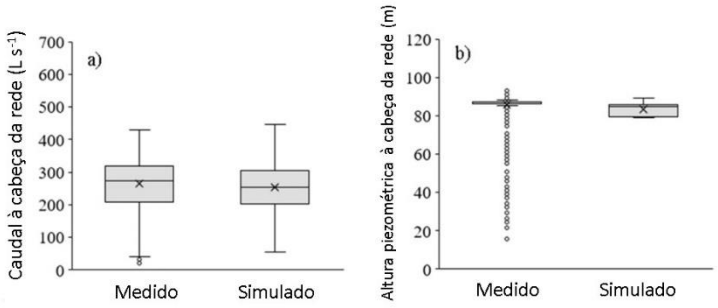


Figura 3. Comparação entre os valores medidos e simulados no cenário atual: a) caudal e b) altura piezométrica, a jusante da estação elevatória principal (PS1) (adaptado de Cameira et al., 2025).

3.2.3. Curvas características e pressão requerida à cabeça da rede

A Figura 4b apresenta as curvas características da rede para três situações do nível de armazenamento na albufeira: máximo, médio e mínimo de exploração no período de ponta. As curvas foram obtidas a partir da geração de 1000 configurações para cada percentagem de bocas de rega em funcionamento simultâneo.

Os resultados mostram que a inclinação das curvas simuladas para o cenário atual é inferior à do projeto original. Este comportamento deve-se, provavelmente, à baixa relação entre a área regada e a área beneficiada que se traduz num caudal

mais baixo e, por conseguinte, em menores perdas de carga na rede, apesar de o coeficiente de rugosidade das condutas ser significativamente mais elevado.

Como resultado, a altura piezométrica requerida à entrada da rede é inferior à proporcionada pela estação elevatória principal. Dado que as bocas de rega estão equipadas com reguladores de pressão que estabilizam a pressão a jusante em 400 kPa, esta situação traduz-se numa ineficiência no uso da energia.

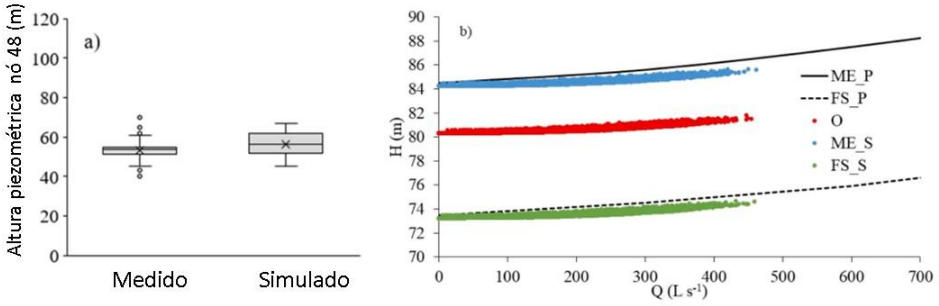


Figura 4. Cenário atual: a) altura piezométrica no nó 48 após a calibração da rugosidade absoluta das condutas; b) curvas características da rede comparadas com o projeto original. (FS_P / ME_P: níveis máximo e mínimo de armazenamento no projeto original; FS_S / ME_S**:** níveis máximo e mínimo de armazenamento simulado; O: nível médio observado em 2022 no período de ponta; H: altura piezométrica no início da rede).

3.2.4. Indicadores de desempenho ao nível dos hidrantes

A análise do desempenho dos hidrantes foi realizada com base em múltiplos regimes de escoamento, considerando um total de 1000 configurações de hidrantes, correspondentes a um caudal a montante Qo = 350 L s^{-1} ± 15% e a uma altura piezométrica a montante Ho=85 m. A Figura 5 apresenta a diferença relativa de pressão (DRP) e o indicador de fiabilidade (F) calculados para o cenário atual. Duas bocas de rega (38 e 39) apresentam défices de pressão pequenos, com valores máximos e médios de 2,2 m e 0,7 m, respetivamente. Além disso, o número de vezes em que estas bocas de rega não garantem a altura piezométrica mínima de 40 m é muito reduzido (média de 96 falhas em 1891 simulações), o que justifica a pequena diminuição na fiabilidade observada no gráfico da direita da Figura 5. Por outro lado, a maioria das bocas de rega funciona com alturas piezométricas excessivas (máximo = 64 m e média = 34 m acima do valor mínimo requerido), o que poderá indicar que a estação de bombagem está sobredimensionada para as condições atuais ou que não estão implementadas regras de operação adequadas. Estes resultados podem, em parte, explicar o elevado consumo energético por unidade de área regada (2 919,9 ± 502,3 kWh ha^{-1}) reportado por [11].

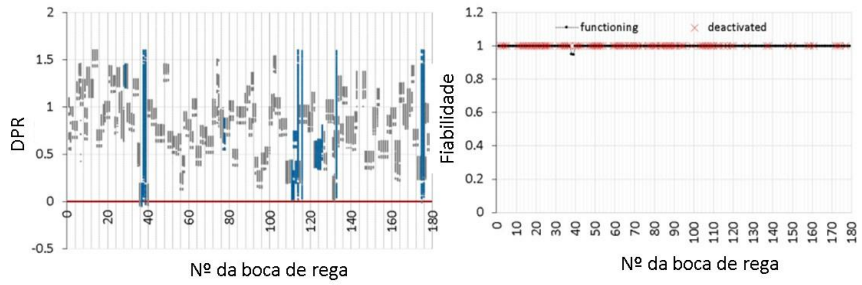


Figura 5. Diferença relativa de pressão (esquerda) e fiabilidade das bocas de rega (direita), para 1000 configurações de bocas de rega, considerando um caudal a montante Q_0 = 350 L s^{-1} ± 15 % e Z_0 = 260 m com a estação sobrepressora (PS2) inativa.

3.3. Resposta da rede de rega aos desafios futuros decorrentes da intensificação do regadio

Após a calibração e validação do software SIGOPRAM, foram implementados dois cenários, Sc1 e Sc2, representando o que se espera para o curto/médio prazo (Quadro 3). Em ambos os cenários, admite-se que adesão ao regadio será de 90%. As necessidades de rega estimadas para as novas culturas foram de 1875 m³ ha^{-1} para o amendoal e 2521 m³ ha^{-1} para o tomate para indústria, com os respetivos qfc de 0,258 l s^{-1} ha^{-1} e 0,604 l s^{-1} ha^{-1}.

Quadro 3. Cenários de simulação considerando diferentes intensidades de regadio e padrões culturais

Cenários de simulação	CS	Sc1	Sc2
Área regada (ha)	456	855	855
Rácio área regada/área beneficiada (%)	48	90	90
Padrão cultural, PC (%)			
Milho	36.3	36.3	25.0
Culturas permanentes			
Olivais	42.2	42.2	15.0
Vinhas	4.0	4.0	4.0
Amendoal	-	-	35.0
Forrageiras	9.4	9.4	0.0
Hortícolas			
Melão e outras	7.3	7.3	6.0
Tomate para indústria	-	-	15.0

A Figura 6a apresenta os caudais a montante para os três cenários analisados. O aumento da área regada conduziu, como seria de esperar, a um acréscimo da procura. A mediana do caudal a montante aumentou de 245 L s^{-1} para 532 L s^{-1} (+117%) no cenário Sc1, e para 645 L s^{-1} (+163%) no cenário Sc2. Como consequência, registou-se um aumento significativo da altura piezométrica necessária durante o período de ponta, de forma a garantir a altura piezométrica mínima exigida no hidrante mais desfavorável, em comparação com a situação atual.

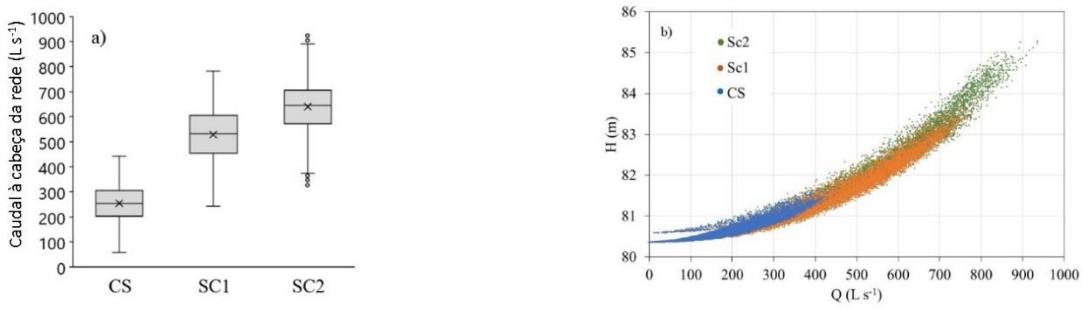


Figura 6. a) Caudais a montante e b) curvas características da rede considerando o nível médio de água no reservatório registado durante o período de ponta de 2022.

A Figura 7 apresenta os resultados da diferença relativa de pressão nas bocas de rega para 1000 regimes de caudal, simulados com um caudal a montante de 650 L s^{-1} ± 10% e uma cota piezométrica a montante de 256 m para o cenário Sc1, e de 667 L s^{-1} ± 10% e uma cota piezométrica a montante de 257 m para o cenário Sc2. Nestas simulações, a estação sobrepressora (PS2) permanece inativa, tal como na situação atual.

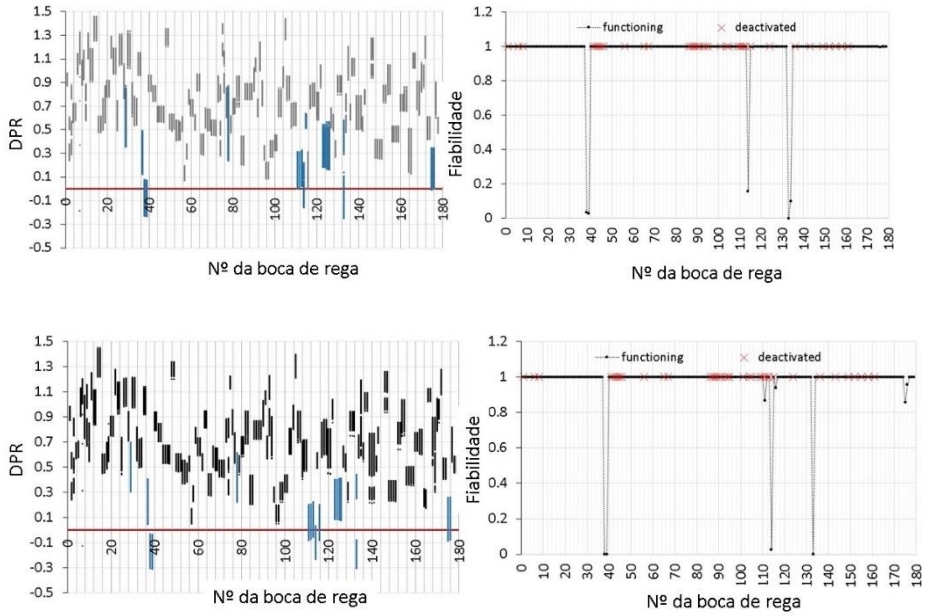


Figura 7. Diferença relativa de pressão (DPR) e fiabilidade das bocas de rega para 1000 regimes de escoamento no cenário Sc1 (Q_0 = 650 L s^{-1} ± 20 % e Z_0 = 256 m; gráficos superiores) e no cenário Sc2 (Q_0 = 667 L s^{-1} ± 20 % e Z_0 = 257 m; gráficos inferiores). A estação PS2 encontra-se inativa.

No cenário Sc1, com a estação PS2 inativa, sete bocas de rega (nº 38, 39, 114, 116, 133, 175 e 176) não cumprem os requisitos mínimos de pressão. Quatro destas falham em mais de 85% das simulações, apresentando fiabilidades inferiores a 0,2, embora as diferenças relativas de pressão sejam inferiores a 30%.

No cenário Sc2, verifica-se falha em oito bocas de rega: as mesmas identificadas em Sc1, mais a boca nº 111. Cinco destas apresentam fiabilidade inferior a 3%, enquanto as restantes três registam falhas em menos de 15% das simulações.

Em ambos os cenários, as bocas de rega com défice de pressão localizam-se em zonas de maior altitude e a maior distância do reservatório (Figura 8). Os seus caudais, entre 4,7 e 80 L·s^{-1}, são semelhantes aos dos restantes pontos da rede, não contribuindo de forma significativa para os défices de pressão observados.

A Figura 9 apresenta a diferença relativa de pressão nas bocas de rega com a estação sobrepressora (PS2) em funcionamento, variantes Sc1_B e Sc2_B. Os resultados mostram que não há défices de pressão. Contudo, observa-se um excesso de pressão muito elevado, com valores máximos de 58,3 m e 57,8 m e valores médios de 28,7 m e 27,3 m para os cenários Sc1_B e Sc2_B, respetivamente.

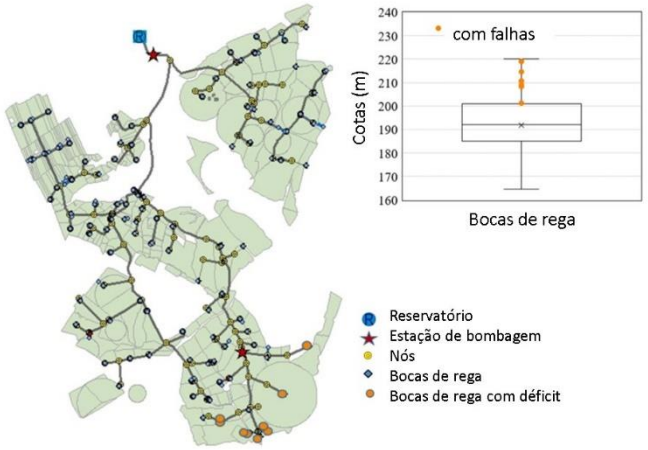


Figura 8. Planta da rede de rega com a identificação das bocas de rega que apresentam défices de pressão (esquerda); cotas do terreno das bocas de rega que apresentaram pelo menos uma falha (direita).

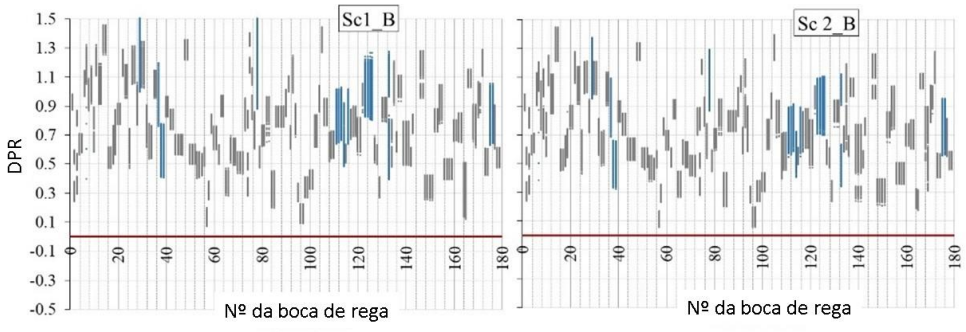


Figura 9. Diferenças relativas de pressão (DRP) para 1000 regimes de escoamento no cenário Sc1_B (Q_0 = 650 L s^{-1} ± 20 % e uma H_0 = de 80,8 m; esquerda) e no cenário Sc2_B (Q_0 = 711 L s^{-1} ± 20 % e H_o = 80,6 m; direita). PS2 em funcionamento.

3.4. Discussão de estratégias para a redução dos custos energéticos

A análise de vários projetos de execução elaborados até ao final do século XX revelou que um pressuposto fundamental era o de que o dimensionamento deveria garantir a pressão mínima, normalmente 400 kPa, no hidrante mais desfavorável. Esta abordagem resultava em sobrepressões significativas na maioria dos hidrantes, comprometendo a eficiência energética em prol da fiabilidade hidráulica. Atendendo a que os custos com energia têm peso significativo nos custos totais de operação [11,22], esta abordagem tende a ser revista.

Os cenários Sc1 e Sc2, bem como as respetivas variantes, indicam que a desativação da estação sobrepressora poderá permitir uma redução significativa dos custos operacionais e de manutenção. Para as bocas com menor fiabilidade, poderia ser adotado um tarifário específico por metro cúbico de água, compensando a eventual necessidade de bombagem ao nível da parcela.

Outra solução passaria pela distribuição a pedido com restrições, que limitaria o funcionamento dos hidrantes mais críticos fora dos períodos de ponta. Apesar da redução de flexibilidade, esta abordagem pode justificar-se pelas poupanças obtidas em custos de conceção e operação.

4. Conclusões e perspetivas futuras

O presente estudo apresenta uma abordagem integrada de modelação para avaliar a fiabilidade hidráulica e a eficiência energética de um sistema de rega coletivo, aplicada ao Aproveitamento Hidroagrícola do Lucefecit. Este sistema inclui uma rede secundária de rega pressurizada, operando a pedido, alimentada por uma estação elevatória principal e complementada por uma estação sobrepressora. A ferramenta desenvolvida foi calibrada e validada com base em dados reais de operação, permitindo simular múltiplos cenários de exploração da rede. A análise dos resultados aponta para uma estratégia de compromisso que contempla a possível desativação da estação sobrepressora, com vista à redução dos custos energéticos, sem comprometer a fiabilidade hidráulica.

References

1. Rodríguez-Díaz, J. A., Pérez-Urrestarazu, L., Camacho-Poyato, E., Montesinos, P., 2011. The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. Span. j. agric. res. 9(4), 1000-1008. doi:10.5424/sjar/20110904-492-10.
2. Córcoles, J. I., Tarjuelo, J. M., Carrión, P. A., Moreno, M. A., 2015. Methodology to minimize energy costs in an on-demand irrigation network based on arranged opening of hydrants. Wate. Resour. Manage. 29, 3697-3710. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1024-9.
3. Tarjuelo, J. M., Rodríguez-Díaz, J. A., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., Moreno, M. A., 2015. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. Agric. Water Manag. 162, 67-77. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009 .

4. Belaud, G., Mateos, L., Aliod, R., Buisson, M. C., Faci, E., Gendre, S., Ghinassi, G., Perea, R. G., Lejars, C., Maruejols, F., Zapata, N., 2020. Irrigation and energy: issues and challenges. Irri. and Drain, 69, 177-185. https://doi.org/10.1002/ird.2343.
5. Lamaddalena, N., & Khila, S., 2013. Efficiency-driven pumping station regulation in on-demand irrigation systems. Irrig Sci 31, 395–410. https://doi.org/10.1007/s00271-011-0314-0.
6. Lamaddalena, N., Pereira, LS., 1998. Performance analysis of on-demand pressurised irrigation systems L.S. Pereira, J.W. Gowing (Eds.), Water and the Environment Innovation Issues in Irrigation and Drainage (1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon), E& FN Spon, London (1998), pp. 247-255.
7. Lamaddalena, N., Sagardoy, JA., 2000. Performance analysis of ondemand pressurized irrigation systems. FAO, Rome. Irrig drain paper, 59. ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ah860e/ah860e.pdf. Accessed 8 Feb 2011.
8. Kang, D., Lansey, K., 2011. Demand and roughness estimation in water distribution systems. J. Water Resour. Plan.Manag. 137(1), 20 - 30. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000086.
9. Rossman, L.A.,2000. EPANET 2: Users Manual. 2000. Available online: https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/EPANET_User_Guide.pdf (accessed on 15 January 2020).
10. Santos, P., 2019. SIGOPRAM, nueva aplicación de ingeniería para el diseño y análisis de redes de riego. In: Workshop on design and installation of pipe networks. 26-28 November, Polytechnical University of Madrid (in Spanish).
11. Cameira, M.R., Rodrigo, I., Garção, A., Neves, M., Ferreira, A., Paredes, P., 2024. Linking participatory approach and rapid appraisal methods to select potential innovations in collective irrigation systems. Agric. Water Manag. 299, 108885. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108885.
12. Calejo, M. J., Lamaddalena, N., Teixeira, J. L., Pereira, L. S., 2008. Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models. Agric. Water Manag. 95(2), 154-162. doi:10.1016/j.agwat.2007.09.011.
13. Clément, R., 1966. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. La Houille Blanche, 52(5), 553-576. https://doi.org/10.1051/lhb/1966034.
14. Ferreira, A., Rolim, J., Paredes, P., Cameira, M. do R., Cameira, M.R., 2022. Assessing Spatio-Temporal Dynamics of Deep Percolation Using Crop Evapotranspiration Derived from Earth Observations through Google Earth Engine. Water 14(15), 2324. https://doi.org/10.3390/W14152324.
15. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irri. and Drain Paper 56. FAO, Rome, Italy p. 300.
16. Pereira, L.S., Paredes, P., López-Urrea, R., Hunsaker, D.J., Mota, M., Shad, Z.M., 2020. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. Agric. Water Manag. 243, 106196. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106196.
17. Pereira, L.S., Paredes, P., Hunsaker, D.J., López-Urrea, R., Shad, Z.M., 2021. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. Agric. Water Manag. 243, 106466.
18. Rallo, G., Paço, T.A., Paredes, P., Puig-Sirera, À., Massai, R., Provenzano, G., Pereira, L.S., 2021. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. Agric. Water Manag. 250, 106645. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106645.
19. Cameira, M.R., Ferreira, A., Boteta, L., Fortes, P. S., & Calejo, M. J. (2025). Present and future challenges for hydraulic reliability and energy efficiency in collective irrigation systems: A participatory modelling approach. Agricultural Water Management, 309, 109355.
20. Lencastre, A., 1996. Hidráulica Geral. Edição de autor, Coimbra. ISBN:972-95859-0-3.
21. Calejo, M. J., Teixeira, J. L., Pereira, L. S., Lamaddalena, N., 2007. Simulação da procura numa rede de rega operando a pedido: o modelo Irdemand. Ingenieria del agua, 14(3), 153-167. https://doi.org/10.4995/ia.2007.2908.
22. Chibeles, C., 2011. Impacts on the Operation of Hydro-Agricultural Developments Resulting from Solutions Adopted in the Design/Construction Phase. The Engineering of Hydro-Agricultural Developments: Current Status and Future Challenges. Technical Conferences of the Portuguese Association of Water Resources, DGADR, Lisbon (in Portuguese).

Assessing Reservoir Inflows in an Ungauged Watershed: A Regionalization Approach Using the Temez Model

Antónia Ferreira [1], João Rolim [1,2], Cláudia Brandão [3] and Maria do Rosário Cameira [1,2]

[1] LEAF - Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food-Research Center, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda,1349-017 Lisbon, Portugal, email: aferreira@isa.ulisboa.pt; joaorolim@isa.ulisboa.pt; roscameira@isa.ulisboa.pt

[2] Associated Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda,1349-017 Lisbon, Portugal

[3]DGADR - Direção dos Serviços de Regadio da DGADR- Direção Geral da Agricultura e Desenvolvimento Rural, Ministério da Agricultura, Av. Afonso Costa, 3, 1949-002 Lisboa, Portugal, email: cbrandao@dgadr.pt

* aferreira@isa.ulisboa.pt

Abstract: The need for sustainable management of water resources is growing as climate change threatens to disrupt the balance between water availability and demand. This study focuses on the "Minutos" reservoir (MR) that supports irrigation in the “Minutos” pressurized collective irrigation system. As de the MR is located in an ungauged watershed in the Tagus basin, there are no long-term hydrometric data, limiting the application of traditional hydrological models and requiring alternative methods for estimating inflows for the reservoir. The Temez model was chosen for its low data requirement and reliable performance in Iberian hydrological studies, as well as its suitability for simulating monthly runoff in regions with missing data. The regionalization approach, a widely used alternative method, based on spatial proximity and physical similarity among watersheds was also applied. The results of the calibration of the Temez model performance efficiency (0.77 to 0.92), indicate a good performance in capturing watersheds characteristics and reproducing the observed data. Hydrological parameters from six neighbouring gauged watersheds were selected based on geographic proximity and similarities in watershed characteristics such as land cover and soil type. The regionalized parameters using inverse distance weighting were 191 mm for maximum storage capacity, 131 mm year^{-1} for infiltration capacity, 0.5 for excess coefficient and 0.06 d^{-1} for aquifer depletion coefficient. This approach demonstrated good performance (0.70 to 0.92) in neighbouring gauged watersheds. This method can assess the future reliability of water supply for MR under various climate scenarios, simulate potential shifts in inflows, and evaluate impacts on reservoir operations. It helps improve the dependability of water supplies in the face of future climate uncertainties by analysing reservoir resilience and offering insights that inform adaptation strategies.

Keywords: “Minutos” reservoir, Spatial proximity, physical similarity, model calibration

1. Introduction

Streamflow regimes are influenced by climate change (CC), human activities, and alterations in land use, affecting water availability in both terms of quantity and

quality [1–3]. The increased frequency and intensity of extreme weather events such as droughts and floods, caused by CC, threatens water-depended systems [1,4]. Assessment of these hydrological alterations is essential to formulate robust and long-term water management strategies. According to Pumo et al.[2], the existence of ungagged watersheds or reduce datasets, makes in many cases the only possible way to assess potential changes in flow is to use appropriate hydrological models to generate flow series. Hydrological models differ in complexity, spatial representation, and temporal resolution [5]. They can be lumped, semi-distributed, or distributed and may operate on a continuous (daily or monthly) or event-based (hourly or minute) basis [5,6]. Distributed models, which capture spatial variability using grid cells, provide detailed insights but require extensive data inputs, increasing parameter uncertainty in data-scarce regions [7]. In contrast, lumped and semi-distributed models, which aggregate watershed characteristics into units, requiring fewer data inputs and offers computational efficiency, making them practical solutions in regions with limited data availability. Several hydrological models were developed, including, HSPF [8], SHETRAN [9] and SWAT [10]. Advances in computing have enabled the development of complex models for detailed hydrological simulations. However, these models often suffer from overparameterization, leading to increased uncertainty and reduced performance [11]. Studies suggest that simpler lumped models provides faster computation and better calibration due to fewer parameters [7,12]. Tegegne et al. [12], found that the use of complex models was not justified in data-poor watersheds. Perrin et al. [13], conclude that model structure is a key factor for stability and complex models often lack robustness. While advanced models are valuable for sediment transport and pollution studies [5,14], simpler models like the Temez model [15] are widely used in data-limited regions due to their minimal data requirements and can also be adapted into a semi-distributed by dividing basins into subunits [5]. The Temez model is widely used in the Iberian Peninsula, such as the integration into Portuguese planning frameworks in 1990s river basin plans and Spain's SIMPA model [16]. Additionally, it has been applied in CC impact assessments, including the SIAM in Portugal [17] and the CEDEX in Spain [18]. Recent applications include evaluating current and future water availability and utilizing the WEI+ scarcity index in Portugal [19]. Studies have demonstrated the model utility in drought management and decision-making, and to assess reservoir performance under different hydroclimatic conditions [20]. However, reliable discharge data are crucial for calibration, and data scarcity remains a challenge. Regionalization methods transfer hydrological information from donor basins to target basins with similar geomorphological, climatic, and hydrological characteristics. These methods are widely used to estimate streamflow in ungauged basins [21,22] and are particularly valuable for predicting future water availability [20,23]. Regionalization approaches

can be categorized into distance-based and regression-based approaches [24,25]. Distance-based methods rely on spatial location or attributes to transfer parameters from similar watersheds [26,27], while regression-based establish relationships between watershed characteristics and hydrological parameters [28]. Studies suggests that distance-based approaches tend to be more reliable than those based solely on physical descriptors [29,30]. Distance-based approaches methods include spatial-proximity (SP) and physical similarity (PS) approaches. SP assumes that neighbouring watersheds exhibit similar hydrological behaviour due to their close location, while PS considers attributes like elevation, soil types, land use, and precipitation [31]. Recent advancements have introduced ensemble-based and signature-based regionalization techniques, which improve parameter transferability. In Portugal, regionalization methods focus on the mean annual discharge, used to establish relationships between discharge and precipitation depending on soil type and temperature [32]. This approach has expanded to synthetic flow generation, very useful for representing hydrological uncertainties [33]. Despite innovations, selecting suitable donor watersheds remains vital for effective regionalization. Combining spatial proximity (SP) and physical similarity (PS) approaches with different averaging techniques can improve outcomes, while using multiple donor watersheds generally enhances performance [24,30], though high thresholds may limit the donor pool [24,34]. Reservoirs are key in regions with variable water availability, such as Mediterranean climates, by regulating water supply during dry periods. However, predicting inflows into reservoirs remains challenging, especially in ungauged rivers and watersheds, due to limited hydrological data and uncertainties in climate projections [4,23,35]. This study focuses on the "Minutos" reservoir (MR) that supports irrigation in the “Minutos” pressurized collective irrigation system. As de the MR is located in an ungauged watershed, there are no long-term hydrometric data, limiting the application of traditional hydrological models and requiring alternative methods for estimating inflows for the reservoir. To overcome challenges in quantifications of hydrologic alterations in the “Minutes” watershed (MT), due to absence of flow records a combination of distance-based regionalization approach was used to generate flow series. The specific objectives area: a) calibration of the Temez model for donor watersheds; b) evaluate the application of distance-based regionalization methods in MT.

2. Materials and Methods

2.1. Case study characterization and data preparation

The “Minutos” reservoir in Alentejo located in southern Portugal is an hydraulic infrastructure located in an ungauged watershed. The Almansor stream is the main

contributor of the MR, included in the Tagus River basin. The watershed area is 95 km2. The absence of flow records in the "Minutos "watershed and long-term data in surrounding watersheds limits the application of traditional hydrological modelling methods. To evaluate potential hydrological alteration, a combination of the Temez model and distance-based regionalization methods was used to generate flow series. Gauged watersheds within a 58 km radius were included in the analysis. The objective was to include the two downstream gauged watersheds. The watersheds excluded were the ones with less than ten years of discharge (Q) data and with an area larger than 1000 km2. Figure 1 shows the selected gauged watersheds. They are Flor da rosa (FR), Odivelas (OD), Pavia (PV), Ponte de Canha (PC), Ponte São Estevão (PE), São Domingos (SD), and Torrão Alentejo (TA).

The discharge and precipitation data were obtained from the Portuguese service of water resources [36] and temperature (Tmax; Tmin) data were obtained from the E-OBS gridded dataset [37]. Precipitation gauges within a 10 km radius were selected and the Thiessen method (Figure 1b) was used to define the weight of each one. Temperature data were interpolated to the centre of the watershed using the Inverse Distance Weighting (IDW) method.

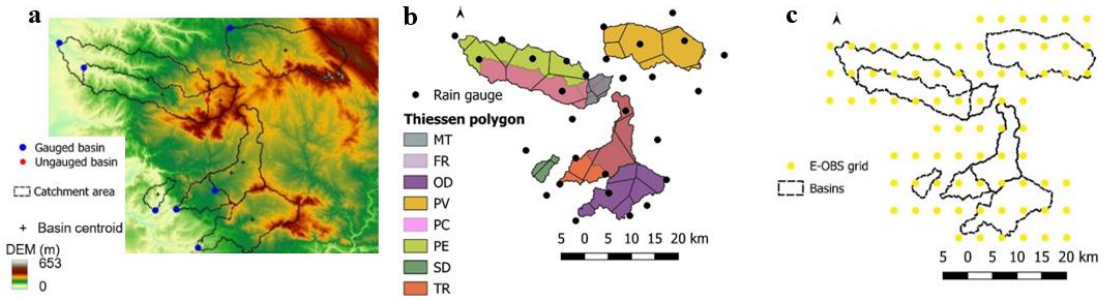


Figure 1. Selected watersheds for calibration: a) Digital terrain elevation; Minutos outlet (red), gauged outlet (blue), watersheds centroid (black cross); b) rain gauges and Thiessen polygons; c) E-OBS grid points for minimum and maximum temperature.

Given that some of the watersheds have precipitation data for the calibration period prior to 1950, a monthly average of temperatures over the period 1950–2000 was used to calibrate the model. The period from 1933/34 to 1949/50 was used because the E-OBS data only extends back to 1950. The temperature data from E-OBS was compared with observed data from the Évora and Divor weather stations. Missing temperature data were filled using monthly average data. Missing precipitation data were estimated by applying linear regressions with the nearest weather station. To identify inhomogeneity in the data sample distribution, the autocorrelation, the trend, the homogeneity of the mean and of the variance and evolution of the mean were tested. A detailed description can be found in Rosa et al. [38] and Ferreira et al. [39].

2.2. Estimation of reference evapotranspiration

The calibrated Hargreaves-Samani equation (Eq. 1) was used to estimate reference evapotranspiration [40].

$$ET_{o-HS} = 0.0135 K_{RS} \frac{Ra}{\lambda} (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) \quad (1)$$

where ETo – HS is the reference evapotranspiration (mm d−1), Tmax, Tmin and Tmean are the maximum, minimum and mean temperatures (°C), λ is the latent heat of vaporization (2.45 MJ kg−1), kRs is the empirical radiation adjustment coefficient (°C−0.5), Ra is the extraterrestrial radiation (MJ m- 2 d-1), 0.0135 is a unit conversion factor and 17.8 is an empirical factor related to temperature units. Calibrated kRS radiation adjustment coefficient was used [39].

2.3. Rainfall-runoff model and calibration procedure

2.3.1. The Temez model

The Temez model [15], is a deterministic and conceptual model used to simulate the water balance in a watershed. It divides the soil into an upper reservoir (unsaturated zone) and a lower reservoir (saturated zone) (Figure 2). The upper reservoir has a maximum water storage capacity (Hmax) and receives water from precipitation (Pt), while losing water through evapotranspiration (ETPt) or by generating an excess (Xt) when its capacity is exceeded. The excess water either infiltrates into the lower reservoir as groundwater recharge (Rt) or contributes to surface runoff (Ht). The lower saturated zone behaves as an aquifer, gradually releasing water to the stream through groundwater discharge (Gt). The total runoff (Tt) from the watershed is given by: Ht + Gt . The model requires calibration of four parameters: i) excess coefficient (C) which represents the separation between retention and runoff in the upper region; ii) maximum storage capacity (Hmax); iii) maximum infiltration (Imax) which is limited by the recharge rate; and iv) aquifer depletion coefficient (α), which controls the aquifer depletion. Due to its simplicity and low data requirements, the Temez model has been applied and well-tested in various watersheds in water resource management studies.

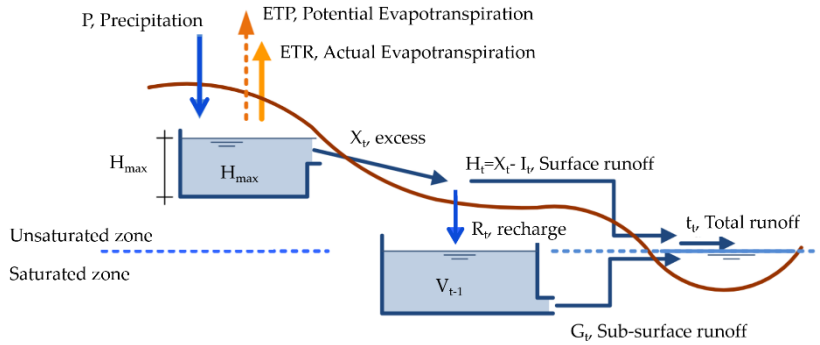


Figure 2. *Schematic representation of the Temez model [5]*

2.3.2. Model calibration and assessment criteria

The calibration process followed the standard procedure of dividing the data series into two periods: an initial longer period (approximately two-thirds of the data) for calibration and a shorter period (one-third of the data) for validation. The studied periods are identified in Table 2, and differ depending on data availability. To facilitate the organisation and application of the different methods to generate the inflow series, the simulation period was standardised from 1933-1934 to 1999-2000. The calibration was done using the Microsoft Excel Solver tool. The model parameters are adjusted by minimizing the sum of squared errors (SSE) between simulated and observed discharges:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (Q_{mod.i} - Q_{obs.i})^2 \quad (2)$$

where Qmod:i is the simulated monthly runoff, Qobs:i is the observed data, n time-steps. To evaluate the performance of the calibrated model the following goodness-of-fit indicators were used: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), and Percent Bias (Pbias) [39]

2.4. Regionalization approach

The regionalization approach uses two distance-based methods; spatial proximity and physical similarity as proposed by Oudin et al. [26]. The spatial proximity method assumes that nearby watersheds exhibit similar behaviour and that watershed features vary uniformly in space. This similarity is attributed to gradual and smooth changes in climate and spatial watershed conditions [26,41]. The spatial proximity between the target ungauged (t) and a donor-gauged watershed (d) was calculated using the Euclidean distance formula (Eq. 3).

$$D_{td} = \sqrt{(x_t - x_d)^2 - (y_t - y_d)^2} \quad (3)$$

where xt, xd and yt, yd stand for the target and donor watershed positions coordinates under the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system and Dtd is the distance between them. For this study, two distances were combined to account for the difference in watershed size and outlet positions: a) centroid distance (dcentroid), which is the distance between the watersheds centroids; b) outlet distance (doutletd), which is the distance between the watersheds outlets. The combined distance (d) was calculated using a weighted sum of 20% doutletd and 80% dcentroid. The physical similarity method assumes that watersheds with similar attributes show similar hydrological behaviours. The core of the method is the selection of the physical similarity metric [30]. Many studies have focused on the selection of a proper similarity index between the donor and ungauged watersheds and the proper watershed attributes for its calculation [42,43]. The similarity index in this study is calculated [44]:

$$SI_{td} = \sum_{i=1}^{k} \frac{\left|CD_{d,i} - CD_{t,i}\right|}{\Delta CD_i} \quad (4)$$

where CD is the watershed descriptor; t and d represent the target and donor watersheds, respectively; k is the total number of watershed descriptors; and DCdi represents the range of ith watershed descriptor. In the present study, the physical similarity method considering distance as one of the watershed descriptors. To transfer the parameter set from donor to target watershed, two averaging techniques were assessed: (1) parameter option (PAR), which transfers model parameters from donor to target; and (2) output option (OUT), which simulates runoff using parameter from donor watersheds in the target watersheds [26,28]. Additionally, two different weighting approaches were used to combine the model parameters or outputs: (1) Arithmetic Mean (AM) method and (2) IDW [28]. In the PAR approach, the parameters were directly transferred from the selected donor, by AM and IDW. In the OUT approach, each set of parameters from the donor was used to simulate runoff for the target watershed, using P and ETo data from the latter. The final simulated runoff series for the target watershed was then transferred using AM and IDW.

3. Results and discussion

3.1. Watersheds attributes

Table 1 presents the main attributes of the selected watershed after a comprehensive data processing.

Table 1. Selected watershed attributes for the regionalization of inflow series

Watershed attributes	MT	FR	OD	PV	PC	PE	SD	TA
Area (Km^2)	94.9	328.0	440.6	616.6	493.8	979.7	61.8	468.0
Main river length	15.3	44.5	52.5	61.2	62.5	74.6	17.3	69.0
Elevation (m)								
Min	243.0	163.0	55.0	136.0	30.0	10.0	16.0	58.0
Mean	306.4	237.3	212.0	264.6	166.6	132.7	84.6	216.0
Max	405.0	380.0	393.0	653.0	428.0	428.0	174.0	380.0
CN II[1]	79.7	80.0	81.5	78.8	75.1	72.5	77.8	80.8
CN III[2]	90.0	90.2	91.0	89.5	87.4	85.8	88.9	90.6
Soil types WRB (SCS[3])								
Cambisols (C)	28.6	34.3	7.5	15.8	5.5	7.3	0.1	24.7
Luvisols (D)	71.4	65.7	92.4	23.6	65.6	50.6	83.9	75.3
Leptosols (D)	0.0	0.0	0.0	47.0	0.9	0.4	0.0	0.0
Podzols (B)	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	41.7	15.0	0.0
Land Cover								
Artificial surfaces	1.7	4.6	0.5	0.6	1.6	1.2	0.0	3.3
Forests	3.2	10.1	19.2	18.7	21.2	29.6	45.3	10.9
Mixed agriculture	40.1	30.3	44.1	51.3	47.5	44.7	17.4	35.4
Pastures	38.9	2.8	8.3	5.4	11.1	7.0	7.0	5.4
Rainfed crops	8.4	45.8	18.8	16.9	10.2	9.0	18.6	38.4
Irrigated land	1.1	3.6	2.7	0.5	3.8	4.8	0.1	3.7
Vineyards	0.0	0.7	1.1	2.2	1.3	1.1	0.0	0.5
Olive groves	0.4	1.9	1.1	4.1	1.6	1.0	8.9	2.1
Rice fields	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	0.0
Water bodies	6.1	0.2	0.1	0.3	1.2	0.8	0.1	0.3
P (1932/33-99/00)	721.9	730.3	624.1	612.4	684.1	667.1	611.0	698.2
ET_o (1950-2023)	1075.2	1144.8	1270.4	1131.2	1136.2	1137.3	1248.3	1255.5
Gauged station								
Code		23I/01H	24I/01H	20I/04H	21F/01H	20E/02H	24H/01	24H/03H
Elevation (m)		163.0	55.0	136.0	30.0	10.0	18.0	58.0
Latitude (°n)		38.4	38.2	38.9	38.8	38.9	38.3	38.3
Longitude (°w)		-8.1	-8.1	-8.0	-8.6	-8.7	-8.3	-8.2
Periods		1933-66	1934-70	1952-90	1979-90	1976-90	1934-61	1965-90

Minutos (MT); Flor da rosa (FR); Odivelas (OD); Pavia (PV); Ponte de Canha (PC); Ponte São Estevão (PE); São Domingos (SD); Torrão Alentejo (TA); CN- Curve number; SCS - Hydrologic soil type according to the soil conservation service, P precipitation; ET_o Evapotranspiration.

The MT target watershed is smaller than most of the donor watersheds, except for SD. MT has a short main river length (15.3 km) and a higher mean elevation (306.4 m), which suggests that runoff travels rapidly. All watersheds exhibit similar CN, indicating comparable runoff potential. The predominant soils in MT, FR, and TA are Luvisols, which are well-drained. PV has a high proportion of Leptosols (47%), indicating shallow, stony soils with low infiltration capacity, whereas PE is dominated by Podzols (41.7%), which indicates a high infiltration capacity. MT is mainly covered by pastures (38.9%) and heterogeneous agricultural areas (40.1%). PV and PC are

dominated by heterogeneous agricultural areas, while SD and PE have a high percentage of forest cover. Regarding the climate, a good correlation between the observed temperatures and E-OBS temperature grid data, enable the direct use to calculate ETo. Most hydrometric stations and rain gauges showed homogeneity at α = 0.05, except for discharge from Santo Estevão and precipitation from Santo Estevão, Sousel, São Geraldo, and Torrão, which only passed the test at α = 0.01. Although heterogeneous data can lead to inconsistent conclusions, observed that climate data are often heterogeneous [35].

3.3. Calibration of the Temez model

The Temez model parameters were determined by minimizing the SSE between the simulated and observed runoff (Table 2). FR (a) has high water storage capacity and moderate runoff potential, reflecting its balanced soil properties with Luvisols (66%) and Cambisols (34%). Its moderate infiltration is shown by CN values (CN II = 79.6 and CN III = 88.8), indicating both runoff generation and infiltration capacity. Calibrated parameters: H_{max} = 171.2 mm and Imax = 145.9 mm. support this, while the excess coefficient (C = 0.75) suggests that a significant portion of rainfall becomes runoff during intense events. The model performs well, with NSE = 0.90 in calibration and NSE = 0.88 in validation. However, a validation P_{bias} during validation (14.66%) indicates a tendency to overestimate runoff, likely due to difficulties in capturing slower baseflow processes.

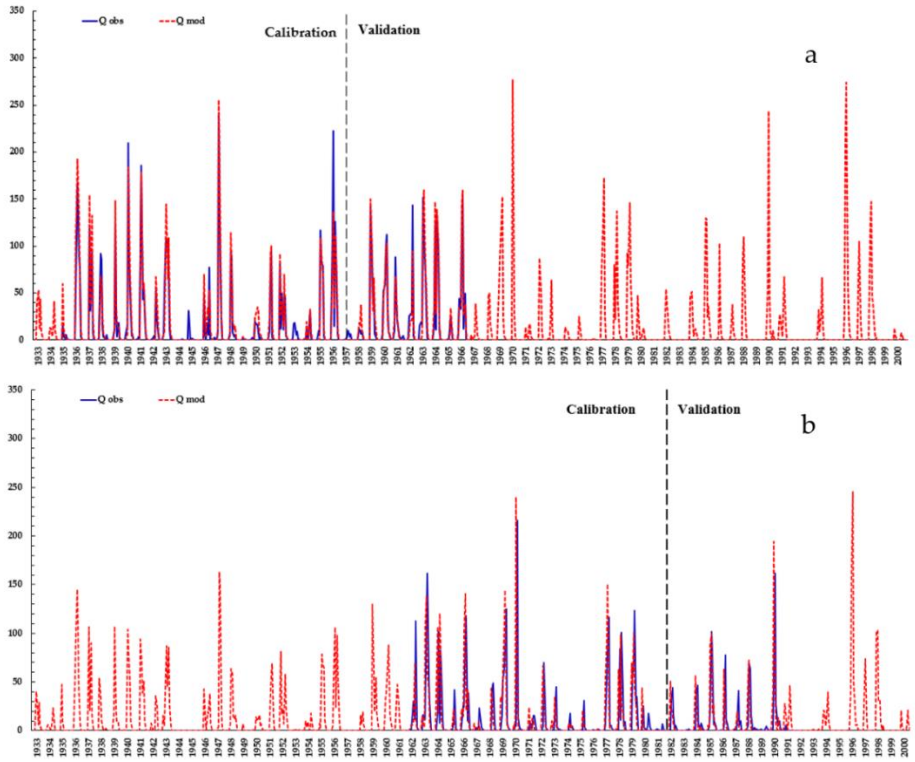


Figure 3. Comparison between the observed and modelled hydrograph (1932-2000): a) Flor da Rosa: calibration (10/1934 - 09/1956); validation (10/1956 - 09/1966); b) Torrão: calibration (10/1961 - 09/1981); validation (10/1961 - 09/1990).

OD has high runoff potential and low infiltration due to its dominant soil type, Luvisols (92.4%), which are compact and contribute to poor water infiltration, as reflected by low infiltration (Imax = 38 mm). The CN values are quite high, with CN II = 81.5 and CN III = 91.0, indicating that precipitation is converted to surface runoff rather than infiltration. The high excess coefficient (C = 0.88) further reinforces this tendency. Model performance is strong during calibration (NSE = 0.88) and validation (NSE = 0.91), though a negative Pbias (-10%) suggests that the model tends to overestimate runoff, due to difficulties in capturing both rapid runoff and slower baseflow, as highlighted by Oudin et al. [26]. OD land cover characteristics further affect its runoff potential, with mixed agriculture covering 44.1% of the area and only 19.2% being forest cover. Thus, the landscape has limited vegetation to slow down or absorb runoff. PV is characterized by steep slopes, with elevations ranging from 136 to 653 m, and low infiltration (Imax = 35.22 mm) due to a high percentage of Leptosols (47%). Steep terrains typically promote rapid runoff leading to low infiltration. This represents a challenge for the model, which is reflected in the relatively high coefficient of variation (CV = 2.8 observed, 2.5 modelled). The model performs well (NSE = 0.91), and the high variability in runoff suggests that capturing the full complexity of PV's hydrological dynamics is difficult. Wang et al. [45] noted that steep, quick-response watersheds are prone to modelling errors, particularly in estimating runoff peaks.

Table 2. Temez model calibration and validation results and goodness –of–fit indicators.

Station	Par		Period	Mean Obs. mm	Std. Obs. mm	CV Obs. -	Mean Mod. mm	Std. Mod. mm	CV Mod. -	NSE -	RMSE mm	P_{bias} %
FR	H_{max} =	171.2	Cal. (10/1934 – 09/1956)	18.0	39.7	2.2	16.2	37.0	2.3	0.90	12.78	9.96
	C=	0.75	Val. (10/1956 – 09/1966)	20.3	37.9	1.9	17.3	34.8	2.0	0.88	12.89	14.66
	I_{max} =	145.9	Glo. (10/1934 – 09/1966)	18.7	39.2	2.1	16.6	36.3	2.2	0.89	12.83	11.55
	α =	0.08										
OD	H_{max} =	111.0	Cal. (10/1934 – 09/1960)	13.7	30.3	2.2	12.7	27.5	2.2	0.88	10.51	7.32
	C=	0.88	Val. (10/1960 – 09/1970)	18.3	36.4	2.0	20.1	40.6	2.0	0.91	10.74	-10.02
	I_{max} =	38.0	Glo. (10/1934 – 09/1970)	15.0	32.1	2.1	14.7	31.8	2.2	0.89	10.53	1.61
	α =	0.05										
PV	H_{max} =	185.7	Cal. (10/1952 – 09/1978)	12.0	26.1	2.2	11.1	25	2.2	0.89	8.51	7.11
	C=	0.46	Val. (10/1978 – 09/1990)	8.5	23.6	2.8	9.4	23.4	2.5	0.91	6.75	-10.43
	I_{max} =	35.2	Glo. (10/1952 – 09/1990)	10.9	25.4	2.3	10.6	24.5	2.3	0.90	8.02	2.77
	α =	0.05										
PC	H_{max} =	230.3	Cal. (10/1979 – 09/1986)	9.8	16.6	1.7	9.8	17.9	1.8	0.77	7.96	-0.81
	C=	0.24	Val. (10/1986 – 09/1990)	12.7	24.1	1.9	12.2	23.7	1.9	0.96	4.55	4.21
	I_{max} =	186.0	Glo. (10/1979 – 09/1990)	10.8	19.6	1.8	10.7	20.2	1.9	0.87	6.92	1.57
	α =	0.03										
PE	H_{max} =	237.5	Cal. (10/1976 – 10/1986)	12.2	23.6	1.9	10.8	23.1	2.1	0.80	10.64	10.96
	C=	0.47	Val (10/1986 – 01/1990)	11.6	20.9	1.8	10.5	27.9	2.6	0.80	9.16	9.34
	I_{max} =	283.7	Glo. (10/1976 – 01/1990)	12	22.9	1.9	10.8	24.3	2.3	0.80	10.29	10.65
	α =	0.06										
SD	H_{max} =	158.4	Cal. (10/1934 – 09/1952)	10.8	23.0	2.1	10.3	22.2	2.1	0.81	10.14	4.19
	C=	0.39	Val. (10/19752 – 09/1990)	11.1	20.2	1.8	11.4	22.9	2.0	0.76	9.96	-2.64
	I_{max} =	41.9	Glo. (10/1952 – 08/1990)	10.9	22.2	2.0	10.7	22.4	2.1	0.79	10.07	2.07
	α =	0.09										
TA	H_{max} =	213.2	Cal. (10/1961– 09/1981)	13.3	30.6	2.3	13.4	31.9	2.4	0.92	8.49	-0.76
	C=	0.42	Val. (10/1981 – 09/1990)	9.8	23.7	2.4	8.5	23.8	2.8	0.76	11.63	12.6
	I_{max} =	138.7	Glo. (10/1961 – 09/1990)	12.2	28.7	2.3	11.9	29.7	2.5	0.89	9.58	2.58
	α =	0.09										

Flor da rosa (FR); Odivelas (OD); Pavia (PV); Ponte de Canha (PC); Ponte São Estevão (PE); São Domingos (SD); Torrão Alentejo (TA); maximum water storage capacity (H_{max}), excess coefficient (C), maximum infiltration (I_{max}), aquifer depletion coefficient (α); Calibration (cal); Validation (val); Global (Glo); observed (Obs); Modelled (Mod) Standard Deviation (Std); coefficient of variation (CV); Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE); Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Root Mean Square Error (NRMSE); Percent Bias (P_{bias}).

In contrast, PC with its high infiltration (I_{max} = 186 mm) demonstrates a good model performance with near-neutral P_{bias} (- 0.81%), although with low NSE (0.77) during calibration. The well-drained Cambisols that dominate PC likely contribute to its high infiltration, which controls peak runoff and leads to more stable discharge patterns. This hydrological behaviour supports the findings of Blöschl et al. [46], who observed that watersheds with higher storage and infiltration capacities tend to exhibit smoother discharge responses. The PE watershed showed the highest water storage capacity (H_{max} = 237.5 mm) and infiltration (I_{max} = 283.7 mm), which is consistent with its large area (979.7 km²), river length (74.6 km), flatter terrain and high percentage of podzols soils (41.7%). The model shows low NSE (0.80) and high RMSE (10.6 mm), probably due to the complex land cover and soil types that influence the infiltration processes. Studies such as Oudin et al. [26] have noted that watersheds with high infiltration and water storage tend to exhibit lower peak runoff, which is consistent with the PE behaviour. The high infiltration capacity controls the runoff, leading to smoother discharge responses. Similarly, Sayama et al. [47] found that watersheds with high storage capacities exhibit lower runoff coefficients and more stable hydrological regimes. SD has a high forest cover (45.3%) and a mixture of Luvisols and Podzols, and thus, shows more complex hydrological responses and high variability in runoff, which is shown by model performance (NSE = 0.81). Forests reduce peak flows by increasing infiltration and ET_o, which is reflected in a slight underestimation of discharge (P_{bias} = - 2.64%). This was confirm by Zhang et al. [48], who observed that forested watersheds often exhibit more complex hydrological responses due to the buffering effect of vegetation on both runoff and evapotranspiration. TA (b) is also characterized by a moderate runoff potential. The soils are mainly Luvisols (75.3%), known for their low infiltration capacity, with some areas of Cambisols (24.7%), which provide slightly better infiltration. Its CN also reflect this balance. The excess coefficient (C = 0.42) and infiltration (I_{max} = 138.7 mm) suggest that the watershed can retain a substantial amount of water, allowing for moderate infiltration while still generating some surface runoff. TA shows good results during calibration (NSE = 0.92), although slightly declines during validation (NSE = 0.76).

3.4. Regionalization of hydrological parameters and outputs

The regionalization of hydrological parameters and simulation outputs for the ungauged MT watershed was conducted using five nearby gauged watersheds, selected based on proximity, physical similarities. Among these, FR, OD, and TA exhibited the highest performance, making them the best candidates for parameter transfer. Although PC and PE had lower performances (NSE = 0.77 and 0.80, respectively), they were included due to their proximity to MT and shared attributes. Most donor watersheds were larger than MT, potentially affecting parameter

transferability. To reduce uncertainty and further validate the regionalization approach, performance comparisons between regionalization methods and observed data in gauged watersheds were conducted.

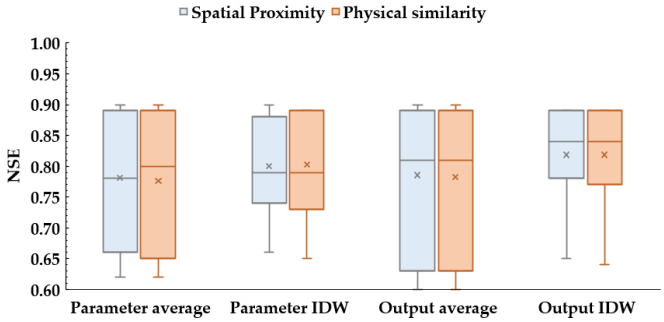


Figure 4. Comparison between regionalization Parameters and Outputs using averaging and IDW

The comparison between SP and PS methods (Figure 4) showed minimal differences, confirming that neither clearly outperforms the other [24]. This showed that the selected donor watersheds exhibit both spatial and physical resemblance, reducing discrepancies in hydrological behaviour. The output-based regionalization method outperformed the parameter-based approach, which is consistent with prior research [24,28]. supporting the idea that transferring simulated outputs yields better results in ungauged basins.

Further analysis indicate that IDW consistently outperformed simple averaging, particularly for output estimation with mean NSE of 0.819 compared to 0.786 for output average. The higher standard deviation of the averaging method indicates greater uncertainty, likely due to including less relevant donor basins. These results confirm that weighted methods like IDW improve accuracy and reduce bias in hydrological parameter estimation, reinforcing the importance of careful donor selection and method choice [41]. Using multiple donor watersheds improves regionalization by reducing random errors, but the optimal number must be carefully chosen. Studies show smaller donor pools perform best (mean NSE = 0.66), while moderate-sized pools perform worst (mean NSE = 0.53), likely due to poor donor-target similarity or subjective selection [28,30]. High similarity thresholds, typically between 0.8 and 0.9, significantly reduced the available donor pool, leading to a decline in performance due to limited donor selection. High similarity thresholds (0.8–0.9) limit the donor pool and reduce performance, confirming that overly strict criteria harm prediction accuracy [22,34]. Thus, a balanced approach is essential—ensuring sufficient similarity without overly restricting donor options [22,25,34]. Simpler models like Temez are preferred for ungauged basins, as fewer parameters reduce uncertainty. Future improvements should explore dynamic

weighting to optimize donor selection based on hydrological conditions. Climate change may increase regionalization uncertainty, highlighting the need for adaptive techniques that account for variability. Further research should refine donor selection using machine learning and test multi-model ensembles to reduce bias and improve parameter transfer reliability.

5. Conclusions

The results of the present study show that the application of Temez model with a regionalization approach, can successfully estimate reservoir inflows from an ungauged watershed, demonstrating the feasibility of alternative hydrological modelling techniques when traditional methods are limited by data scarcity. The calibration results (NSE = 0.77–0.92) confirm that the model captures watershed characteristics and reproduces observed hydrological patterns, making it a reliable tool for runoff simulation. The Temez model is considered as a robust tool for simulating inflows and informing adaptive management strategies for the reservoir under varying climate conditions. The regionalization process, using IDW, provided robust parameter estimates for the Minutos watershed, ensuring that key hydrological properties such as maximum storage capacity, infiltration capacity, excess coefficient, and aquifer depletion coefficient were accurately transferred from similar neighbouring basins. The strong model performance across gauged watersheds (NSE = 0.70–0.92) reinforces the applicability of this approach for hydrological assessments in data-limited regions. Furthermore, this study highlights the potential of regionalization and hydrological modelling in assessing the resilience of water supply systems under future climate conditions. This study will enable the simulation of changes in inflows, evaluating reservoir operations, and informing adaptation strategies and enhances the dependability of water resources in ungauged watersheds. Future work should focus on integrating climate projections and refining regionalization techniques to further improve the accuracy and reliability of hydrological assessments in the context of climate variability and water resource management.

Author Contributions: Conceptualization, A.F., M.R.C.; J.R.; methodology, AF.; calibration and validation, writing—original draft preparation, A.F.; writing—review M.R.C.; J.R.; C.B.; supervision, M.R.C.; J.R.; C.B.; funding acquisition, A.F.
Funding: Antónia Ferreira gratefully acknowledges funding from the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under the PhD grant PRT/BD/154133/2022.; LEAF- UIDB/04129/2020; Terra- LA/P/0092/2020.
Conflicts of Interest: Declare conflicts of interest.

References

1. Pumo, D.; Francipane, A.; Cannarozzo, M.; Antinoro, C.; Noto, L.V. Monthly Hydrological Indicators to Assess Possible Alterations on Rivers' Flow Regime. Water Resour. Manag. 2018, 32, 3687–3706, doi:10.1007/s11269-018-2013-6.
2. Richter, B.D.; Baumgartner, J.V.; Powell, J.; Braun, D.P. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. Conserv. Biol. 1996, 10, 1163–1174, doi:10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
3. Martinez Santa-Maria, C.; Fernández-Yuste, J.A. Obtención de escenarios de régimen ambiental de caudales (RAC) a partir del régimen natural: Una nueva extensión del software IAHRIS. In Proceedings of the I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial—RestauraRíos, León, Spain, 18–20 October 2013.
4. Leta, O.T.; El-Kadi, A.I.; Dulai, H. Impact of Climate Change on Daily Streamflow and Its Extreme Values in Pacific Island Watersheds. Sustainability 2018, 10, 2057, doi:10.3390/su10062057.
5. Proença De Oliveira, R.; Simões, J. Acerca dos modelos de balanço hídrico propostos por Thornthwaite e Mather, Temez e Soil Conservation Service. RH 2022, 43, 57–78, doi:10.5894/rh43n1-cti5.
6. Quintela, A.; Portela, M. A Modelação Hidrológica em Portugal nos Últimos 25 Anos do Século XX, nas Perspectivas Determinística, Probabilística e Estocástica. RH 2002, 7, 51–64, doi:10.21168/rbrh.v7n4.p51-64.
7. Darbandsari, P.; Coulibaly, P. Inter-Comparison of Lumped Hydrological Models in Data-Scarce Watersheds Using Different Precipitation Forcing Data Sets: Case Study of Northern Ontario, Canada. J. Hydrol. Reg. Stud. 2020, 31, 100730, doi:10.1016/j.ejrh.2020.100730.
8. Donigian, A., Jr.; Bicknell, B.; Imhoff, J. Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF). In Computer models of watershed hydrology.; V. P. Singheditor, Ed.; Water Resources Publications, 1995; pp. 395–442 ISBN 978-0-918334-91-6.
9. Burton, A.; Bathurst, J.C. Physically Based Modelling of Shallow Landslide Sediment Yield at a Catchment Scale. Environ. Geol. 1998, 35, 89–99, doi:10.1007/s002540050296.
10. Arnold, J.G.; Moriasi, D.N.; Gassman, P.W.; Abbaspour, K.C.; White, M.J.; Srinivasan, R.; Kannan, N. SWAT: Model Use, Calibration and Validation. Transact. ASABE 2012, 1491–1508, doi:https://doi.org/10.13031/2013.42256.
11. Kirchner, J.W. Catchments as Simple Dynamical Systems: Catchment Characterization, Rainfall-runoff Modeling, and Doing Hydrology Backward. Water Resour. Res. 2009, 45, 2008WR006912, doi:10.1029/2008WR006912.
12. Tegegne, G.; Park, D.K.; Kim, Y.O. Comparison of Hydrological Models for the Assessment of Water Resources in a Data-Scarce Region, the Upper Blue Nile River Basin. J. Hydrol. Reg. Stud. 2017, 14, 49–66, doi:10.1016/j.ejrh.2017.10.002.
13. Perrin, C.; Michel, C.; Andréassian, V. Does a Large Number of Parameters Enhance Model Performance? Comparative Assessment of Common Catchment Model Structures on 429 Catchments. J. Hydrol. 2001, 242, 275–301, doi:10.1016/S0022-1694(00)00393-0.
14. Santos, F.M.; de Oliveira, R.P.; Mauad, F.F. Lumped versus Distributed Hydrological Modeling of the Jacaré-Guaçu Basin, Brazil. J. Environ. Eng. 2018, 144, 04018056, doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001397.
15. Témez, J.R. Modelo Matemático de Transformación "Precipitación-Aportación". Comisión E. Explotación y Garantía. Grupo de Trabajo de Predicciones de Precipitación y Relación entre Precipitaciones y Caudales. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica, 1977, 52 pp.
16. Calvo-Rubio, F. C., Lorenzo, F. E., Monreal, T. E. Algunas Contribuciones Técnicas Del Libro Blanco Del Agua En España. Revista Digital del Cedex 1999,. (115), 79-79. https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1494
17. Cunha, L. V., Ribeiro, L., Oliveira, R. P., Nascimento, J. Recursos hídricos, in Santos, F.D; Miranda, P.; 2006. Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II, 115-168, Gradiva
18. CEDEX Evaluación del impacto del câmbio climático en los recursos hídricos y sequias en España.; Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría de Estado de Medio Ambiente, Oficina Española de Cambio Climático.; Madrid, 2017;
19. Sondermann, M.N.; Proença de Oliveira, R. Using the WEI+ Index to Evaluate Water Scarcity at Highly Regulated River Basins with Conjunctive Uses of Surface and Groundwater Resources. Sci. Total Environ. 2022, 836, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155754.

20. Vieira, J.; Cunha, M.C.; Luís, R. Integrated Assessment of Water Reservoir Systems Performance with the Implementation of Ecological Flows under Varying Climatic Conditions. Water Resour. Manag. 2018, 32, 5183–5205, doi:10.1007/s11269-018-2153-8.
21. Arsenault, R.; Martel, J.-L.; Brunet, F.; Brissette, F.; Mai, J. Continuous Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Long Short-Term Memory Neural Networks Clearly Outperform Traditional Hydrological Models. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2023, 27, 139–157, doi:10.5194/hess-27-139-2023.
22. Qi, W.; Chen, J.; Li, L.; Xu, C.-Y.; Li, J.; Xiang, Y.; Zhang, S. Regionalization of Catchment Hydrological Model Parameters for Global Water Resources Simulations. Hydrol. Res. 2022, 53, 441–466, doi:10.2166/nh.2022.118.
23. Ghimire, S.; Shrestha, S.; Hok, P.; Heng, S.; Nittivattanaon, V.; Sabo, J. Integrated Assessment of Climate Change and Reservoir Operation on Flow-Regime and Fisheries of the Sekong River Basin in Lao PDR and Cambodia. Environ. Res. 2023, 220, 115087, doi:10.1016/j.envres.2022.115087.
24. Qi, W.; Chen, J.; Li, L.; Xu, C.-Y.; Xiang, Y.; Zhang, S.; Wang, H.-M. Impact of the Number of Donor Catchments and the Efficiency Threshold on Regionalization Performance of Hydrological Models. J. Hydrol. 2021, 601, 126680, doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126680. J. Hydrol.
25. Yang, X.; Li, F.; Qi, W.; Zhang, M.; Yu, C.; Xu, C.-Y. Regionalization Methods for PUB: A Comprehensive Review of Progress after the PUB Decade. Hydrol. Res. 2023, 54, 885–900, doi:10.2166/nh.2023.027.
26. Oudin, L.; Andréassian, V.; Perrin, C.; Michel, C.; Le Moine, N. Spatial Proximity, Physical Similarity, Regression and Ungaged Catchments: A Comparison of Regionalization Approaches Based on 913 French Catchments. Water Resou. Res. 2008, 44, doi:10.1029/2007WR006240.
27. Parajka, J.; Merz, R.; Bloschl, G. A Comparison of Regionalisation Methods for Catchment Model Parameters. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2005, 9(3), 157-171, https://doi.org/10.5194/hess-9-157-2005.
28. Yang, X.; Magnusson, J.; Rizzi, J.; Xu, C.-Y. Runoff Prediction in Ungauged Catchments in Norway: Comparison of Regionalization Approaches. Hydrol. Res. 2017, 49, 487–505, doi:10.2166/nh.2017.071.
29. Parajka, J.; Viglione, A.; Rogger, M.; Salinas, J.L.; Sivapalan, M.; Blöschl, G. Comparative Assessment of Predictions in Ungauged Basins – Part 1: Runoff-Hydrograph Studies. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013, 17, 1783–1795, doi:10.5194/hess-17-1783-2013.
30. Yang, X.; Magnusson, J.; Huang, S.; Beldring, S.; Xu, C.-Y. Dependence of Regionalization Methods on the Complexity of Hydrological Models in Multiple Climatic Regions. J. Hydrol. 2020, 582, 124357, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124357.
31. Samuel, J.; Coulibaly, P.; Metcalfe, R.A. Evaluation of Future Flow Variability in Ungauged Basins: Validation of Combined Methods. Adv. in Water Resour. 2012, 35, 121–140, doi:10.1016/j.advwatres.2011.09.015.
32. Portela, M.M.; Quintela, A.C. Regionalization of Hydrologic Information: Establishment of Flow Series at Ungauged Watersheds (Carvoeiro, Portugal). WIT Trans. Ecol. and the Environ. 2005, 80, 11–20, doi:doi:10.2495/WRM050021.
33. Silva, A.T.; Portela, M.M. Disaggregation Modelling of Monthly Streamflows Using a New Approach of the Method of Fragments Disaggregation Modelling of Monthly Streamflows Using a New Approach. Hydrol. Sci. J. 2012, 37–41, doi:10.1080/02626667.2012.686695.
34. Tarek, M.; Arsenault, R.; Brissette, F.; Martel, J.-L. Daily Streamflow Prediction in Ungauged Basins: An Analysis of Common Regionalization Methods over the African Continent. Hydrol. Sci. J. 2021, 66, 1695–1711, doi:10.1080/02626667.2021.1948046.
35. Ahmad, M.J.; Cho, G.; Choi, K.S. Historical Climate Change Impacts on the Water Balance and Storage Capacity of Agricultural Reservoirs in Small Ungauged Watersheds. J. Hydrol. Reg. Stud. 2022, 41, 101114, doi:10.1016/j.ejrh.2022.101114.
36. SNIRH. Redes De Monitorização. Available online: https://snirh.apambiente.pt/ (accessed on 15 March 2025).
37. C3S Copernicus Climate Change Service Available online: https://cds.climate.copernicus.eu/.(accessed on 20 March 2025).
38. Rosa, R.D.; Paulo, A.A.; Matias, P.G.; Espırito Santo, M.F.; Pires, V.C. Tratamento da qualidade das séries de dados climáticos quanto a homogeneidade, aleatoriedade e tendência e completagem de séries de dados. In In Gestão do Risco em Secas, Métodos, Tecnologias e Desafios Pereira, LS, Mexia, JT, and Pires, C (Eds); Ediçoes Colibri, CEER, 2010; pp. 119–139 ISBN 978-989-689-066-7.

39. Ferreira, A.; Cameira, M. do R.; Rolim, J. Methodology for Obtaining ETo Data for Climate Change Studies: Quality Analysis and Calibration of the Hargreaves–Samani Equation. Climate 2024, 12, 205, doi:10.3390/cli12120205.
40. Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Appl. Eng. in Agric. 1985, 1, 96–99.
41. Merz, R.; Blöschl, G. Flood Frequency Regionalisation—Spatial Proximity vs. Catchment Attributes. J. Hydrol. 2005, 302, 283–306, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.018.
42. Yang, X.; Magnusson, J.; Xu, C.-Y. Transferability of Regionalization Methods under Changing Climate. J. Hydrol. 2019, 568, 67–81, doi:10.1016/j.jhydrol.2018.10.030.
43. McIntyre, N.; Lee, H.; Wheater, H.; Young, A.; Wagener, T. Ensemble Predictions of Runoff in Ungauged Catchments. Water Resou. Res. 2005, 41, 2005WR004289, doi:10.1029/2005WR004289.
44. Burn, D.H.; Boorman, D.B. Estimation of Hydrological Parameters at Ungauged Catchments. J. Hydrol. 1993, 143, 429–454, doi:10.1016/0022-1694(93)90203-L.
45. Sayama, T.; McDonnell, J.J.; Dhakal, A.; Sullivan, K. How Much Water Can a Watershed Store? Hydrol. Process. 2011, 25, 3899–3908, doi:10.1002/hyp.8288.
46. Blöschl, G. Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales; Cambridge University Press, 2013; ISBN 1-107-02818-3.
47. Wang, C.; Shang, S.; Jia, D.; Han, Y.; Sauvage, S.; Sánchez-Pérez, J.-M.; Kuramochi, K.; Hatano, R. Integrated Effects of Land Use and Topography on Streamflow Response to Precipitation in an Agriculture-Forest Dominated Northern Watershed. Water 2018, 10, 633, doi:10.3390/w10050633.
48. Zhang, M.; Liu, N.; Harper, R.; Li, Q.; Liu, K.; Wei, X.; Ning, D.; Hou, Y.; Liu, S. A Global Review on Hydrological Responses to Forest Change across Multiple Spatial Scales: Importance of Scale, Climate, Forest Type and Hydrological Regime. J. Hydrol. 2017, 546, 44–59, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.12.040.

Assessing climate change impacts on maize cropping systems using a set of agroclimatic indicators

Daniela Soares [1,*], João Rolim [1], Paula Paredes[1] and Teresa A. Paço[1]

[1] LEAF—Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Center, Associate Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal ; dsoares@isa.ulisboa.pt; joaorolim@isa.ulisboa.pt; pparedes@isa.ulisboa.pt; tapaco@isa.ulisboa.pt

* Correspondence: dsoares@isa.ulisboa.pt

Abstract: The Coruche region is a main grain maize-producing region. This study aims to analyze climate change impacts under the 10 and 90th percentile of two RCP scenarios - 4.5 and RCP8.5. Thus, a set of agroclimatic indicators, which includes: the number of days with a maximum temperature greater or equal to 36 °C (DTMx) during the flowering; the number of days with a minimum temperature below -2 °C (DTMn) during the germination period; seasonal accumulated precipitation (SAPr); Length of the growth cycle (LGC) in terms of growing-degree-days; and the aridity index (AI) for two periods (baseline: 1971-2000; future: 2071-2100) were considered. The main findings show that: the increase in mean temperature will allow for sowing earlier, avoiding high temperatures during the flowering period projected due to the increase in DTMx. DTMn will not compromise the sowing date. The SAPr will decrease, putting pressure on water resources. Concerning the LGC, the results show a decrease. The AI decreases because the average annual precipitation is lower while the mean potential annual climatic evapotranspiration is higher. These results indicate changes in agroclimatic conditions, leading to implications for crop development and, consequently, crop irrigation requirements, and yield.

Keywords: agroclimatic zoning; aridity index; accumulated precipitation; growing-degree-days; length of growth cycle

1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is the second most produced crop in the world and plays a crucial role in global food security [1,2]. Maize is cultivated across nearly 200 million hectares [3], corresponding to approximately 14% of the world's arable land [4]. Although maize production is led by the United States of America, China, and Brazil, accounting for 31%, 24%, and 10% of world production [5], this crop is important in many countries. In Portugal (PT), maize is a major agricultural crop, with the most recent information available (2023) showing an area of 75,390 ha and a production of around 767,210 tonnes [6].

Climate change (CC) projections indicate an increase in annual air temperature and a decrease in precipitation amount, associated with a higher frequency and intensity of extreme events such as floods, heat waves, and droughts [7], with Portugal being considered a climate change "hot spot" [8–11]. As agriculture is highly dependent on natural resources and climatic conditions [12], CC has important impacts on production systems, affecting crop productivity [13–15], and consequently farmers' economic returns.

As maize is a sensitive crop in terms of temperature and water stress at certain growth stages, the predicted CC poses major challenges for its cultivation. The rise in temperatures accelerates crop development, as the rate of crop development is linearly related to temperature accumulation, giving farmers new opportunities for double cropping, as many authors have pointed out [16–19]. Several studies have reported that short periods with high temperatures, *e.g.,* heat waves, especially with temperatures above 36 °C during the flowering period [20], are a critical factor as they reduce pollen viability [21,22], leading to yield losses. Conversely, late frosts [23] and minimum temperatures below -2 °C during the early growth stages can hinder germination and plant establishment [24] as well as cause significant damage to the plant's growth process, leading to a high decrease in yields [23]. Furthermore, the imbalance between water supply (precipitation) and water demand (reference evapotranspiration, ET_o), indicates an increasing trend toward drier conditions, increasing the pressure on water resources [25–28].

Agroclimatic indicators can provide good insights into crops cultivation feasibility under shifting environmental conditions. Agroclimatic zoning, which has been widely used by FAO [29], has proven to be a good tool to help farmers and decision-makers understand the suitability and sustainability of a given region for different crops. The Copernicus Climate Change Service provides for several bio- and agroclimatic indicators at different temporal and spatial scales. These indicators, derived from different global climate models (GCM) and different representative concentration pathways (RCP), can help to assess for example, temperature extremes, precipitation variability, and overall climatic suitability for certain crop production [19,30]. The available indicators include average temperature (AT), growing degree days (GDD), dry days (DD), summer days (SD), frost days (FD), dry spells (DS), accumulated precipitation (AP), and the aridity index (AI). The use of a set of agroclimatic indicators to evaluate the future suitability of crops has been broadly explored globally. Only some studies have focused on annual crops [31–34], while several have examined the effects of CC on perennial crops [35–39]. In the case of maize, some studies have employed agroclimatic indicators as an approach to assess its response to changing climatic conditions [19,40,41]. For example, for

mainland Portugal, Soares et al [19] reported that areas traditionally used for maize silage could be shifted to maize grain production, especially in northern areas, as the required maize thermal unit is achieved in the future. Therefore, agroclimatic indicators could be a good tool to support farmers and policymakers and allow the design of targeted adaptation strategies [19], but with appropriate participatory approaches [42] to ensure the appropriateness and adoption of these strategies.

This study aims to improve the understanding of climate change impacts on maize production by integrating diverse agroclimatic indicators. Specifically, it aims to fill the knowledge gap on the suitability of maize production in the Coruche maize-producing region under future RCP scenarios. To support decision-making by farmers and other stakeholders, the research will focus on (1) selecting a set of agroclimatic indicators to characterize maize suitability and (2) assessing climatic changes that may pose challenges to maize production.

2. Materials and Methods

2.1. Case study locations and its baseline climate characterization

This study was carried out in the Coruche region of southern Portugal. This is one of the main maize-producing regions (Figure 1).

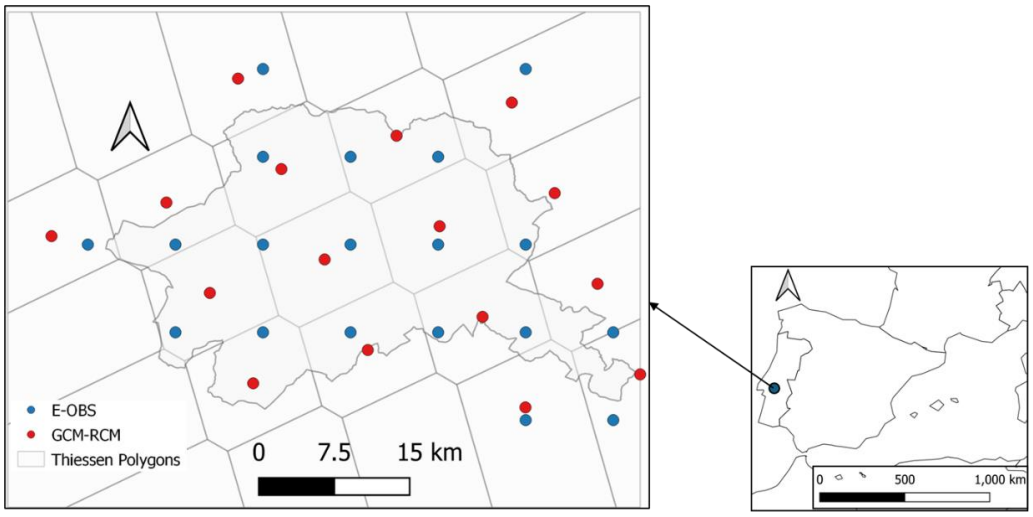


Figure 1. The region under study – Coruche, Portugal, Iberian Peninsula. The grids of the observational weather data of the E-OBS and GCM-RCM models' combination are also shown.

Coruche has a temperate climate characterized by mild, rainy winters and dry, hot summers, corresponding to a Csa of the Köppen-Geiger climate classification system [43]. The E-OBS observational gridded dataset (version v28.0e, [44]), was used for detail the mean daily climate data for the baseline period of 1971-2000. The E-OBS weather data was first assessed in terms of quality assurance and quality control (QAQC) [45–47]. A bias correction was performed using the Coruche weather data station (38°56' N; 8°30' W, 18.8 m elevation), operated by the Portuguese

Institute for Sea and Atmosphere (IPMA), and considering the nearest grid point, using the linear-scaling approach [48]. A brief characterization of the climate relative to the maize crop season and the baseline period (1971-2000) after correcting the E-OBS data is shown in Figure 2. The average temperature during the baseline period was 18.8 °C with an average seasonal precipitation of about 238 mm, while the seasonal ET_o averaged 750 mm.

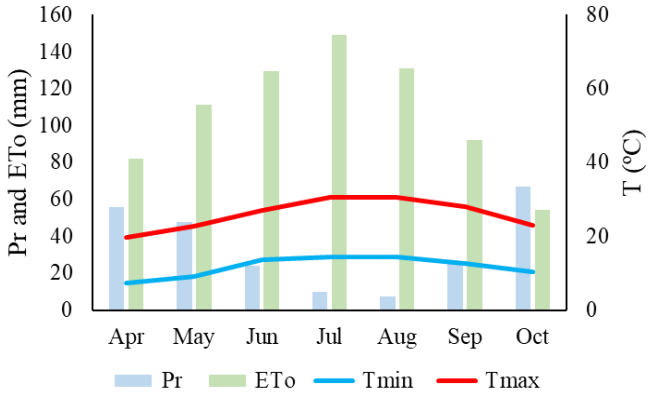


Figure 2. Monthly average climatic data for Coruche was obtained from the corrected E-OBS climate data, for 1971-2000.

2.2. Climate change projections data

In the present study, two time periods were considered: the past baseline (1971-2000) and the long-term future (2071-2100). As previously pointed, the E-OBS corrected database was considered for the baseline period. Regarding the future, both temperatures and precipitation data were retrieved from the EURO-CORDEX project (0.11° latitude x 0.11° longitude, Figure 1) and downloaded from the Climate Data Store of the Copernicus Climate Change Services [49].

To assess climate change impacts on maize for the long-term future period, a three-member ensemble of Global Climate Model (GCM) - Regional Climate Model (RCM) chain simulations (Table 1) was used to cover inter-model variability and reduce single-model uncertainties [50]. Additionally, the simulations were forced by two different future anthropogenic radiative scenarios - RCP4.5 and RCP8.5, which are intermediate (with moderately ambitious mitigation policies), and a high-emissions pathway (that does not include any mitigation target), respectively [7].

Table 1. List of combinations GCM-RCM used in this research.

Global Circulation Model (GCM)	Regional Climate Model (RCM)
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E
CNRM-CERFACS-CM5	CLMcom-CLM-CCLM4-8-17
CNRM-CERFACS-CM5	SMHI-RCA4

Two percentiles of the anomalies were then considered - the 10th and 90th percentiles (P10 and P90 respectively). Extreme events and climatic variability can be identified using this type of methodology, which covers 80% of the observed variability in the dataset, excluding the extremes. Percentile 10 makes it possible to consider the lowest temperatures and the lowest precipitation. P90, on the other hand, allows the study of the highest temperatures and the highest amount of precipitation [51].

2.2.1. Bias Correction

The Delta Change method was used for the bias correction as it is commonly used in water resources studies [52–54]. The climate change data series have been produced considering each Thiessen polygon (Figure 1) by disturbing the observed data series (E-OBS, blue dots in Figure 1) with the climate anomalies produced by the GCM-RCM combinations mentioned above (red dots in Figure 1) for both RCP scenarios. While temperatures are calculated in an additive approach, precipitation is obtained using a multiplicative approach [48,55,56].

2.3. Agroclimatic indicators

As agriculture is a highly climate-dependent economic sector, this study, focusing on the maize season (April-October), included the analysis of the following agroclimatic indicators, i) the number of days with minimum temperature below -2°C (DTMn), ii) the number of days with a maximum temperature greater or equal to 36 °C (DTMx), iii) seasonal accumulated precipitation (SAPr, in mm), during the maize season, iv) length of the growth cycle (LGC, considering the growing degree (GDD) approach) and the v) aridity index (AI). As mentioned above, during the germination period, temperatures below -2 °C are detrimental to crop survival. For this reason, the DTMn for April was used and extended to March in case farmers anticipate the sowing date due to adequate temperature conditions. The maximum temperatures in May, June, and July are particularly important, as these are the months when flowering and pollination usually take place, depending on the sowing date, and therefore heat stress must be assessed, as it has been shown to lead to severe yield losses in maize. DTMx was also obtained for these months, considering a temperature threshold value of 36 °C. The SAPr is a good indicator of water availability during the growing period, likely influencing yields. The LGC was estimated using the GDD approach, considering the base temperature of 10 °C and the upper temperature of 32 °C [57]. This approach takes as a baseline a maize variety FAO600, traditionally used in the region, with an accumulated GDD of 1785 °C. The last agroclimatic indicator, AI defined by the UNEP [58], examines the aridity in each series of 30-year data, for both percentile and RCP scenarios, allowing for future water resources availability

information and supporting water management practices. AI ranges from 0 to >1, with AI<0.05 corresponding to Hyper-arid climates, 0.05≤AI<0.20 are arid climates, 0.20≤AI<0.50 for Semi-arid climates, 0.50≤AI<0.65 for dry sub-humid climates, 0.65≤AI<1.0 Moist sub-humid and AI≥1.0 for Humid climates.

According to the groups defined by the United Nations Environment Programme (UNEP,) Coruche could be characterized as a moist and dry sub-humid climate (0.5≤AI<1.0).

The above-mentioned agroclimatic indicators were calculated for each period separately (1971-2000, 2071-2100). For each year and for DTMn, and DTMx agroclimatic indicators, if a given grid box achieves the corresponding threshold, it was assigned a value of 1. Otherwise, it was assigned a value of 0. Then, for each year the values were treated. The SAPr corresponds to the sum of precipitation, for each year for the maize season. The LGC agroclimatic indicator was obtained using a Python tool that calculates the length of the cycle according to a given value of accumulated GDD for each year, considering 15th April as the sowing date, which is commonly used in the region. This indicator allows to assess the average duration of the crop cycle, per year, percentile, and climatic scenario. The AI agroclimatic indicator is obtained by dividing the mean annual precipitation and the mean annual potential climatic evapotranspiration as defined by Thornthwaite's equation [59].

3. Results and Discussion

DTMn

The number of days with minimum temperature below -2 °C during the germination period (April) and extended to March was estimated for the Coruche location. However, it was found that both for the baseline and for future climate scenarios the average DTMn was 0 and thus, not compromising the sowing date and, consequently, the crop growth cycle.

DTMx

For the baseline period, the average number of days with a maximum temperature greater than or equal to 36 °C in Coruche (Table 2) was 0 for May and June and 3 for July. For future projections, the increase in air temperature will lead to an increase in the DTMx. However, as expected, a significant increase will occur below the 90th percentile for the RCP8.5 scenario. In Coruche, the number of extreme heat days is projected to reach 2, 11, and 17 in May, June, and July respectively. These results suggest that earlier sowing (also allowed by the DTMn indicator) or using varieties with shorter cycles are favorable hypotheses to reduce the exposure of the

flowering period to heat waves that affect the yield and productivity, in line with the results reported in several studies [17,20,60,61].

Table 2. Number of days (average) with a maximum temperature greater than 36 °C (DTMx) during the flowering period – from May to July, in Coruche. The values in brackets [] correspond to a range of variations. P10 and P90 represent the ten and ninety percentiles, respectively.

Location			**P10**			**P90**		
	Period	Scenario	May	Jun	Jul	May	Jun	Jul
Coruche, PT	2071-2100	RCP4.5	0 [0-3]	2 [0-8]	5 [0-13]	1 [0-6]	5 [0-21]	12 [1-26]
		RCP8.5	1 [0-13]	5 [0-16]	9 [0-20]	2 [0-15]	11 [0-22]	17 [2-30]

SAPr

The average SAPr for the baseline period was 271 mm. The seasonal accumulated precipitation during the maize season (April-October) for future projections is shown in Table 3. The results show negative anomalies in both percentiles and climate scenarios. Thus, under the pessimistic scenario, there could be variations from -40 to -9%, corresponding to 163 and 246 mm, respectively. The results achieved in this study are higher than those presented by Soares et al [19] for Coruche, which vary from 146 to 124 mm, under the RCP4.5 and RCP8.5, respectively

Table 3. Future seasonal accumulated precipitation (mean ± standard deviation, mm), during the maize season (Apr-Oct), in Coruche, during the 2071-2100 period. P10 and P90 represent the ten and ninety percentiles, respectively.

Location	Period	Scenario	P10	Δ (%)	P90	Δ (%)
Coruche, PT	2071-2100	RCP4.5	206 ±62	-24	249 ±74	-8
		RCP8.5	163 ±48	-40	246 ±77	-9

LGC

The future LGC (DOY means ± standard deviation) calculated using the GDD approach is shown in Table 4. GDD were accumulated using the 15th of April as the sowing date (i.e. DOY 104). Results show that for the baseline period weather conditions, the targeted 1785 °C is reached around 294 DOY (± 22). By comparing the baseline with the future values, the accumulated GDD is achieved earlier. Therefore, the cycle duration will be shorter. As expected, the results are more pronounced in the pessimistic scenario, due to the projected general increase in temperature, reaching a difference of 68 days in the length of the cycle,

corresponding to a reduction of 23%. Yang et al [62], also focusing on the Coruche region, using the GDD approach, but with a Tbase = 8 °C and Tupper = 30 °C, reported a decrease of about 6% and 12% of the cycle duration for the RCP4.5 and RCP8.5, respectively, for the period 2061–2080.

Table 4. Length of the growth cycle for both climate scenarios, considering the GDD approach, expressed in days of the year (DOY), for Coruche. P10 and P90 represent the ten and ninety percentiles, respectively.

Location	Period	Scenario	P10	Δ (%)	P90	Δ (%)
Coruche, PT	2071-2100	RCP4.5	279±25	-5	243±10	-17
		RCP8.5	247±15	-16	226±10	-23

AI

Using the baseline period the computed AI was 0.8, thus corresponding to a moist sub-humid climate (0.65≤AI<1.0). In the assessment of the other period and both scenarios, the AI value is lower for all scenarios under unfavorable conditions (10^{th} percentile of temperatures combined with the 90^{th} percentile of precipitation) and for the RCP8.5 under the most favorable scenario (90^{th} percentile of temperatures combined with the 10^{th} percentile of precipitation) (Table 5), due to the combined effect of the projected decrease in the mean annual precipitation and the higher mean annual potential climatic evapotranspiration. Although the values of the aridity index are projected to decrease the climatic classification is maintained relative to the baseline period, for the most favorable hypothesis, changes to dry sub-humid and semi-arid climate in the unfavorable conditions are expected, for the RCP4.5 and RCP8,5, respectively. The values achieved under RCP8.5 agree with the results reported by Costa et al. [63] for the same region. An increase in aridity was also reported in another study [19] also carried out for Coruche, but with a different approach to calculating AI. A similar increase of aridity was reported for Spain by García-Garizábal et al [64].

Table 5. AI for each 30 years, considering the percentile, and RCP scenario, for Coruche.

Location	Period	Scenario	Most favorable	Unfavorable
Coruche, PT	2071-2100	RCP4.5	0.8	0.6
		RCP8.5	0.7	0.4

Most favorable – the combination of the 10th percentile of temperatures with the 90th percentile of precipitation; Unfavorable – the combination of the 90th percentile of temperatures with the 10th percentile of precipitation.

4. Conclusions

Future climate projections using an ensemble percentile approach under different RCP scenarios indicate significant changes in agroclimatic conditions for Coruche (Portugal) by the end of the 21st century. The results highlight an increase in the number of days with maximum temperatures above 36°C during the flowering period, potentially affecting the maize flowering and consequently reducing crop yield.

Seasonal accumulated precipitation is projected to decrease in Coruche, which puts increased pressure on water resources management. In addition, the crop growing cycle is projected to shorten, with more pronounced reductions occurring in the more pessimistic scenario (RCP8.5).

The aridity index is projected to decrease due to lower precipitation and higher potential evapotranspiration, exacerbating water scarcity during the maize season. In specific cases, the overall climatic classification of the region changes from a moist sub-humid climate to a dry sub-humid and semi-arid climate.

Given these findings, it is crucial to adopt adaptive management strategies, including selecting heat-tolerant maize varieties, adjusting the cropping calendar, and designing tailor-made water-saving management practices, in collaboration with the various stakeholders, to mitigate the impact of climate change on crop productivity.

Author Contributions: Conceptualization, D.S., J.R., P.P., and T.A.P.; methodology, D.S.; writing—original draft preparation, D.S.; writing—review and editing, J.R, P.P., T.A.P.; supervision, J.R, P.P., T.A.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Daniela Soares was funded by the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) through the researcher contract 2022.10607.BD.

Acknowledgments: We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project UERRA (https://www.uerra.eu) and the Copernicus Climate Change Service, and the data providers in the ECA&D project (https://www.ecad.eu). Additionally, we are grateful to the Institute of the Sea and Atmosphere (Portugal) for providing the climate data. The support of FCT—Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., under the projects WaterQB "Integrated web-based platform for supporting irrigation management aiming at coping with climate variability and changes" project (PTDC/AGR-AAM/04553/2022, https://doi.org/10.54499/2022.04553.PTDC), UIDB/04129/2020 of LEAF-Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food, Research Unit and LA/P/0092/2020 of Associate Laboratory TERRA is also acknowledged. The SMARTWATER project funded by

the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 952396 is also acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. You, N.; Dong, J.; Li, J.; Huang, J.; Jin, Z. Rapid Early-Season Maize Mapping without Crop Labels. *Remote Sensing of Environment* **2023**, *290*, 113496, doi:10.1016/j.rse.2023.113496.
2. Ishfaq, S.; Ding, Y.; Liang, X.; Guo, W. Advancing Lodging Resistance in Maize: Integrating Genetic, Hormonal, and Agronomic Insights for Sustainable Crop Productivity. *Plant Stress* **2025**, *15*, 100777, doi:10.1016/j.stress.2025.100777.
3. Erenstein, O.; Jaleta, M.; Sonder, K.; Mottaleb, K.; Prasanna, B.M. Global Maize Production, Consumption and Trade: Trends and R&D Implications. *Food Sec.* **2022**, *14*, 1295–1319, doi:10.1007/s12571-022-01288-7.
4. World Bank. Arable Land (Hectares)—World. 2025. Available online: https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.ARBL.HA?locations=1W (accessed on 12 January 2025).
5. *USDA. Production—Corn. 2025. Available online: https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0440000 (accessed on 5 January 2025).*
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) *FAOSTAT: Crops and Livestock Products*;
7. Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc) *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; 1st ed.; Cambridge University Press, 2023; ISBN 978-1-009-32584-4.
8. Giorgi, F.; Meleux, F. Modelling the Regional Effects of Climate Change on Air Quality. *Comptes Rendus. Géoscience* **2007**, *339*, 721–733, doi:10.1016/j.crte.2007.08.006.
9. Drobinski, P.; Da Silva, N.; Bastin, S.; Mailler, S.; Muller, C.; Ahrens, B.; Christensen, O.B.; Lionello, P. How Warmer and Drier Will the Mediterranean Region Be at the End of the Twenty-First Century? *Reg Environ Change* **2020**, *20*, 78, doi:10.1007/s10113-020-01659-w.
10. Lima, D.C.A.; Bento, V.A.; Lemos, G.; Nogueira, M.; Soares, P.M.M. A Multi-Variable Constrained Ensemble of Regional Climate Projections under Multi-Scenarios for Portugal – Part II: Sectoral Climate Indices. *Climate Services* **2023**, *30*, 100377, doi:10.1016/j.cliser.2023.100377.
11. Soares, P.M.M.; Careto, J.A.M.; Russo, A.; Lima, D.C.A. The Future of Iberian Droughts: A Deeper Analysis Based on Multi-Scenario and a Multi-Model Ensemble Approach. *Nat Hazards* **2023**, *117*, 2001–2028, doi:10.1007/s11069-023-05938-7.
12. Ho, T.T.; Shimada, K. The Effects of Climate Smart Agriculture and Climate Change Adaptation on the Technical Efficiency of Rice Farming—An Empirical Study in the Mekong Delta of Vietnam. *Agriculture* **2019**, *9*, 99, doi:10.3390/agriculture9050099.
13. Webber, H.; Ewert, F.; Olesen, J.E.; Müller, C.; Fronzek, S.; Ruane, A.C.; Bourgault, M.; Martre, P.; Ababaei, B.; Bindi, M.; et al. Diverging Importance of Drought Stress for Maize and Winter Wheat in Europe. *Nat Commun* **2018**, *9*, 4249, doi:10.1038/s41467-018-06525-2.
14. Lizaso, J.I.; Ruiz-Ramos, M.; Rodríguez, L.; Gabaldon-Leal, C.; Oliveira, J.A.; Lorite, I.J.; Rodríguez, A.; Maddonni, G.A.; Otegui, M.E. Modeling the Response of Maize Phenology, Kernel Set, and Yield Components to Heat Stress and Heat Shock with CSM-IXIM. *Field Crops Research* **2017**, *214*, 239–254, doi:10.1016/j.fcr.2017.09.019.
15. Gabaldón-Leal, C.; Webber, H.; Otegui, M.E.; Slafer, G.A.; Ordóñez, R.A.; Gaiser, T.; Lorite, I.J.; Ruiz-Ramos, M.; Ewert, F. Modelling the Impact of Heat Stress on Maize Yield Formation. *Field Crops Research* **2016**, *198*, 226–237, doi:10.1016/j.fcr.2016.08.013.
16. Castaño-Sánchez, J.P.; Karsten, H.D.; Rotz, C.A. Double Cropping and Manure Management Mitigate the Environmental Impact of a Dairy Farm under Present and Future Climate. *Agricultural Systems* **2022**, *196*, 103326, doi:10.1016/j.agsy.2021.103326.
17. Minoli, S.; Jägermeyr, J.; Asseng, S.; Urfels, A.; Müller, C. Global Crop Yields Can Be Lifted by Timely Adaptation of Growing Periods to Climate Change. *Nat Commun* **2022**, *13*, 7079, doi:10.1038/s41467-022-34411-5.

18. Gammans, M.; Mérel, P.; Ortiz-Bobea, A. Double Cropping as an Adaptation to Climate Change in the United States. *American J Agri Economics* **2024**, ajae.12491, doi:10.1111/ajae.12491.
19. Soares, D.; Paredes, P.; Paço, T.A.; Rolim, J. Projected Bioclimatic Changes in Portugal: Assessing Maize Future Suitability. *Agronomy* **2025**, *15*, 592, doi:10.3390/agronomy15030592.
20. Ben-Ari, T.; Adrian, J.; Klein, T.; Calanca, P.; Van Der Velde, M.; Makowski, D. Identifying Indicators for Extreme Wheat and Maize Yield Losses. *Agricultural and Forest Meteorology* **2016**, *220*, 130–140, doi:10.1016/j.agrformet.2016.01.009.
21. Wang, Y.; Tao, H.; Tian, B.; Sheng, D.; Xu, C.; Zhou, H.; Huang, S.; Wang, P. Flowering Dynamics, Pollen, and Pistil Contribution to Grain Yield in Response to High Temperature during Maize Flowering. *Environmental and Experimental Botany* **2019**, *158*, 80–88, doi:10.1016/j.envexpbot.2018.11.007.
22. Lizaso, J.I.; Ruiz-Ramos, M.; Rodríguez, L.; Gabaldon-Leal, C.; Oliveira, J.A.; Lorite, I.J.; Sánchez, D.; García, E.; Rodríguez, A. Impact of High Temperatures in Maize: Phenology and Yield Components. *Field Crops Research* **2018**, *216*, 129–140, doi:10.1016/j.fcr.2017.11.013.
23. Charalampopoulos, I. Agrometeorological Conditions and Agroclimatic Trends for the Maize and Wheat Crops in the Balkan Region. *Atmosphere* **2021**, *12*, 671, doi:10.3390/atmos12060671.
24. Melo-Abreu, J.P. *Agrometeorologia. Aplicação Da Meteorologia Para Maximizar a Produção Agrícola*; Editora Agrobook, 2018; ISBN 978-989-8927-20-0.
25. Iglesias, A.; Santillán, D.; Garrote, L. On the Barriers to Adaption to Less Water under Climate Change: Policy Choices in Mediterranean Countries. *Water Resour Manage* **2018**, *32*, 4819–4832, doi:10.1007/s11269-018-2043-0.
26. Fader, M.; Shi, S.; Von Bloh, W.; Bondeau, A.; Cramer, W. Mediterranean Irrigation under Climate Change: More Efficient Irrigation Needed to Compensate for Increases in Irrigation Water Requirements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2016**, *20*, 953–973, doi:10.5194/hess-20-953-2016.
27. Hatfield, J.L.; Dold, C. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 103, doi:10.3389/fpls.2019.00103.
28. Islam, A.T.; Islam, A.S.; Islam, G.T.; Bala, S.K.; Salehin, M.; Choudhury, A.K.; Dey, N.C.; Hossain, A. Adaptation Strategies to Increase Water Productivity of Wheat under Changing Climate. *Agricultural Water Management* **2022**, *264*, 107499, doi:10.1016/j.agwat.2022.107499.
29. Fischer, G., Nachtergaele, F.O., van Velthuizen, H.T., Chiozza, F., Franceschini, G., Henry, M.,; Muchoney, D. & Tramberend, S *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v4) Model Documentation*; FAO & IIASA, 2021; p. 303 pp.;
30. Freitas, T.R.; Santos, J.A.; Paredes, P.; Fraga, H. Future Aridity and Drought Risk for Traditional and Super-Intensive Olive Orchards in Portugal. *Climatic Change* **2024**, *177*, 155, doi:10.1007/s10584-024-03813-3.
31. Yue, Y.; Zhang, P.; Shang, Y. The Potential Global Distribution and Dynamics of Wheat under Multiple Climate Change Scenarios. *Science of The Total Environment* **2019**, *688*, 1308–1318, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.153.
32. Olfert, O.; Weiss, R.M.; Catton, H.; Cárcamo, H.; Meers, S. Bioclimatic Assessment of Abiotic Factors Affecting Relative Abundance and Distribution of Wheat Stem Sawfly (Hymenoptera: Cephidae) in Western Canada. *Can Entomol* **2019**, *151*, 16–33, doi:10.4039/tce.2018.46.
33. Akpoti, K.; Groen, T.; Dossou-Yovo, E.; Kabo-bah, A.T.; Zwart, S.J. Climate Change-Induced Reduction in Agricultural Land Suitability of West-Africa's Inland Valley Landscapes. *Agricultural Systems* **2022**, *200*, 103429, doi:10.1016/j.agsy.2022.103429.
34. Kamruzzaman, M.; Shariot-Ullah, Md.; Islam, R.; Amin, M.G.M.; Islam, H.M.T.; Ahmed, S.; Yildiz, S.; Muktadir, A.; Shahid, S. Projections of Future Bioclimatic Indicators Using Bias-Corrected CMIP6 Models: A Case Study in a Tropical Monsoon Region. *Environ Sci Pollut Res* **2024**, *31*, 64596–64627, doi:10.1007/s11356-024-35487-w.
35. Cabré, M.F.; Quénol, H.; Nuñez, M. Regional Climate Change Scenarios Applied to Viticultural Zoning in Mendoza, Argentina. *Int J Biometeorol* **2016**, *60*, 1325–1340, doi:10.1007/s00484-015-1126-3.
36. Adão, F.; Campos, J.C.; Santos, J.A.; Malheiro, A.C.; Fraga, H. Relocation of Bioclimatic Suitability of Portuguese Grapevine Varieties under Climate Change Scenarios. *Front. Plant Sci.* **2023**, *14*, 974020, doi:10.3389/fpls.2023.974020.
37. Rodrigo-Comino, J.; Salvia, R.; Quaranta, G.; Cudlín, P.; Salvati, L.; Gimenez-Morera, A. Climate Aridity and the Geographical Shift of Olive Trees in a Mediterranean Northern Region. *Climate* **2021**, *9*, 64, doi:10.3390/cli9040064.

38. Chou, C.; Marcos-Matamoros, R.; López-Nevado, J.; López-Feria, S.; González-Reviriego, N. Comparison of Five Strategies for Seasonal Prediction of Bioclimatic Indicators in the Olive Sector. *Climate Services* **2023**, *30*, 100345, doi:10.1016/j.cliser.2023.100345.
39. Özdel, M.M.; Ustaoğlu, B.; Cürebal, İ. Modeling of the Potential Distribution Areas Suitable for Olive (Olea Europaea L.) in Türkiye from a Climate Change Perspective. *Agriculture* **2024**, *14*, 1629, doi:10.3390/agriculture14091629.
40. Zhang, Z.; Yang, X.; Liu, Z.; Bai, F.; Sun, S.; Nie, J.; Gao, J.; Ming, B.; Xie, R.; Li, S. Spatio-Temporal Characteristics of Agro-Climatic Indices and Extreme Weather Events during the Growing Season for Summer Maize (Zea Mays L.) in Huanghuaihai Region, China. *Int J Biometeorol* **2020**, *64*, 827–839, doi:10.1007/s00484-020-01872-6.
41. Villa-Falfán, C.; Valdés-Rodríguez, O.A.; Vázquez-Aguirre, J.L.; Salas-Martínez, F. Climate Indices and Their Impact on Maize Yield in Veracruz, Mexico. *Atmosphere* **2023**, *14*, 778, doi:10.3390/atmos14050778.
42. Cameira, M. do R.; Rodrigo, I.; Garção, A.; Neves, M.; Ferreira, A.; Paredes, P. Linking Participatory Approach and Rapid Appraisal Methods to Select Potential Innovations in Collective Irrigation Systems. *Agricultural Water Management* **2024**, *299*, 108885, doi:10.1016/j.agwat.2024.108885.
43. Beck, H.E.; Zimmermann, N.E.; McVicar, T.R.; Vergopolan, N.; Berg, A.; Wood, E.F. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-Km Resolution. *Sci Data* **2018**, *5*, 180214, doi:10.1038/sdata.2018.214.
44. Cornes, R.C.; Van Der Schrier, G.; Van Den Besselaar, E.J.M.; Jones, P.D. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *JGR Atmospheres* **2018**, *123*, 9391–9409, doi:10.1029/2017JD028200.
45. Hofstra, N.; Haylock, M.; New, M.; Jones, P.D. Testing E-OBS European High-Resolution Gridded Data Set of Daily Precipitation and Surface Temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2009**, *114*, doi:10.1029/2009JD011799.
46. Viviroli, D.; Archer, D.R.; Buytaert, W.; Fowler, H.J.; Greenwood, G.B.; Hamlet, A.F.; Huang, Y.; Koboltschnig, G.; Litaor, M.I.; López-Moreno, J.I.; et al. Climate Change and Mountain Water Resources: Overview and Recommendations for Research, Management and Policy. *Hydrology and Earth System Sciences* **2011**, *15*, 471–504, doi:10.5194/hess-15-471-2011.
47. Bouizrou, I.; Bouadila, A.; Aqnouy, M.; Gourfi, A. Assessment of Remotely Sensed Precipitation Products for Climatic and Hydrological Studies in Arid to Semi-Arid Data-Scarce Region, Central-Western Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* **2023**, *30*, 100976, doi:10.1016/j.rsase.2023.100976.
48. Teutschbein, C.; Seibert, J. Bias Correction of Regional Climate Model Simulations for Hydrological Climate-Change Impact Studies: Review and Evaluation of Different Methods. *Journal of Hydrology* **2012**, *456–457*, 12–29, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
49. C3S, E.-C. project Climate Data Store 2024.
50. Freitas, T.R.; Santos, J.A.; Silva, A.P.; Martins, J.; Fraga, H. Climate Change Projections for Bioclimatic Distribution of Castanea Sativa in Portugal. *Agronomy* **2022**, *12*, 1137, doi:10.3390/agronomy12051137.
51. Ngai, S.T.; Juneng, L.; Tangang, F.; Chung, J.X.; Salimun, E.; Tan, M.L.; Amalia, S. Future Projections of Malaysia Daily Precipitation Characteristics Using Bias Correction Technique. *Atmospheric Research* **2020**, *240*, 104926, doi:10.1016/j.atmosres.2020.104926.
52. Lenderink, G.; Buishand, A.; Van Deursen, W. Estimates of Future Discharges of the River Rhine Using Two Scenario Methodologies: Direct versus Delta Approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2007**, *11*, 1145–1159, doi:10.5194/hess-11-1145-2007.
53. Graham, L.P.; Andréasson, J.; Carlsson, B. Assessing Climate Change Impacts on Hydrology from an Ensemble of Regional Climate Models, Model Scales and Linking Methods – a Case Study on the Lule River Basin. *Climatic Change* **2007**, *81*, 293–307, doi:10.1007/s10584-006-9215-2.
54. Räty, O.; Räisänen, J.; Ylhäisi, J.S. Evaluation of Delta Change and Bias Correction Methods for Future Daily Precipitation: Intermodel Cross-Validation Using ENSEMBLES Simulations. *Clim Dyn* **2014**, *42*, 2287–2303, doi:10.1007/s00382-014-2130-8.
55. Soares, D.; Rolim, J.; Fradinho, M.J.; Paço, T.A.D. Climate Change Impacts on Irrigation Requirements of Preserved Forage for Horses under Mediterranean Conditions. *Agronomy* **2020**, *10*, 1758, doi:10.3390/agronomy10111758.
56. Branquinho, S.; Rolim, J.; Teixeira, J.L. Climate Change Adaptation Measures in the Irrigation of a Super-Intensive Olive Orchard in the South of Portugal. *Agronomy* **2021**, *11*, 1658, doi:10.3390/agronomy11081658.

57. Pereira, L.S.; Allen, R.; Paredes, P.; Smith, M.; Raes, D.; Salman, M. *FAO Irrigation & Drainage paper 56rev, Rome (In press)*. 2025,.
58. UNEP *World Atlas of Desertification*; Arnold, London, 1997;
59. Middleton, N. J., & Thomas, D. S. *World Atlas of Desertification*; 1992;
60. Shrestha, S.; Himics, M.; Van Doorslaer, B.; Ciaian, P. IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON EU AGRICULTURE. *RAAE* **2013**, *16*, 24–39, doi:10.15414/raae.2013.16.02.24-39.
61. Moradi, R.; Koocheki, A.; Nassiri Mahallati, M. Adaptation of Maize to Climate Change Impacts in Iran. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* **2014**, *19*, 1223–1238, doi:10.1007/s11027-013-9470-2.
62. Yang, C.; Fraga, H.; Ieperen, W.V.; Santos, J.A. Assessment of Irrigated Maize Yield Response to Climate Change Scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management* **2017**, *184*, 178–190, doi:10.1016/j.agwat.2017.02.004.
63. Costa, R.; Fraga, H.; Fernandes, P.M.; Santos, J.A. Implications of Future Bioclimatic Shifts on Portuguese Forests. *Reg Environ Change* **2017**, *17*, 117–127, doi:10.1007/s10113-016-0980-9.
64. García-Garizábal, I.; Causapé, J.; Abrahao, R.; Merchan, D. Impact of Climate Change on Mediterranean Irrigation Demand: Historical Dynamics of Climate and Future Projections. *Water Resour Manage* **2014**, *28*, 1449–1462, doi:10.1007/s11269-014-0565-7.

Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas en un oxisol del piedemonte llanero de Colombia

Janeth González-Nivia[1], Fernando Lozano-Osorno [2] y Jesús Hernán Camacho-Tamayo[2,*]

[1] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia

[2] Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia

* Correspondencia: jhcamachot@unal.edu.co

Resumen: La calidad de los suelos es influenciada por su origen, ubicación y actualmente, por el uso/ocupación, afectando las propiedades a través del manejo de enmiendas, fertilizantes, riego y mecanización. El presente estudio tuvo por objetivo evaluar la incidencia de diferentes usos y ocupaciones en las propiedades físicas en un suelo del piedemonte llanero. Para esto, se realizó muestreo en 10 usos/ocupaciones. Para cada uso/ocupación se realizó muestreo en los dos primeros horizontes. In situ pruebas se realizaron pruebas de infiltración y pruebas de resistencia mecánica a la penetración. Los resultados fueron analizados mediante ANOVA y pruebas de Duncan. Las propiedades determinadas fueron desde el punto de vista físico textura, densidad aparente, densidad real, lámina de agua aprovechable, conductividad hidráulica saturada, estabilidad de agregados, diámetro medio ponderado, porosidad total, infiltración y resistencia a la penetración. La influencia del uso/ocupación se presentó en el horizonte superficial, debido a las prácticas de manejo del suelo implementadas. Al caracterizar los suelos de la zona de estudio, se encuentra que su oferta es baja ya que presentan, bajos niveles de retención de agua, valores medio a altos de densidad aparente que lleva a pensar en la susceptibilidad a la compactación.

Palabra clave: calidad de suelo; indicadores; manejo; análisis de componentes principales.

1. Introducción

La productividad del suelo, junto con el mantenimiento de la fertilidad, es uno de los elementos fundamentales para la sostenibilidad de los agroecosistemas, por lo cual el uso de indicadores de calidad facilita información sobre el comportamiento y variación de los suelos. La identificación de cambios en las propiedades permite realizar una mejor valoración de los factores ambientales, con el fin de verificar y evaluar los resultados de la aplicación de acuerdos internacionales y de programas de acción, así como orientar políticas tanto nacionales y regionales.

El aumento en la producción agropecuaria para satisfacer la creciente demanda de alimentos e insumos agroindustriales ejercerá aún más presión sobre los recursos naturales. Por esto, el uso de indicadores permite valorar la situación real de la capacidad de producción agrícola de tierras y su cambio en el tiempo, insumo necesario para la promoción de prácticas de gestión con el fin de mantener o mejorar la productividad del suelo y propender por un uso sostenible de los recursos naturales [1]. El inadecuado uso del suelo ya sea por labranza, deficiente manejo del agua de riego o por falta de rotación de cultivos, lleva a que se presenten limitantes del suelo, que afectan la productividad. El manejo antrópico de estos recursos ha conllevado a que estos limitantes se acentúen, dada la preocupación de aumentar la productividad del suelo, que conlleva al uso excesivo e indiscriminado de insumos externos que contaminan los suelos, así como las aguas con que se aplican en los cultivos, que en ocasiones no son de calidades apropiadas para su uso en la agricultura. El sistema de laboreo y la rotación de cultivos son prácticas de manejo con reconocida capacidad de modificar la calidad del suelo [2]. La implementación de sistemas de producción que incluyen rotación anual de cultivos con pasturas perennes, mejora los indicadores de calidad del suelo y reducen la erosión.

La calidad del suelo se estudia desde aspectos físicos, químicos y biológicos, para la valoración del grado de degradación de los suelos o procesos de mejoramiento, y para identificar las prácticas de gestión sostenible del suelo o de algunas limitaciones físicas que puedan suceder [3]. Para [4], estos aspectos poseen una característica común en el suelo unida a la estructura, por lo que consideran que la forma de evaluar la calidad física del suelo, es la integración de varias propiedades, a partir de una definición que pondere las propiedades físicas del suelo.

De acuerdo con [5], el término “calidad del suelo” se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo: (1) fomentar la productividad del sistema sin degradar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad sostenible); (2) amortiguar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) beneficiar la salud de plantas, animales y humanos. Con este concepto, también se considera que el suelo es el sustrato básico para las plantas; debido a que capta, retiene y libera agua y es un filtro ambiental efectivo [6]. Así, este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa [7].

De acuerdo con [8], un suelo de calidad tiene la capacidad de producir cultivos nutritivos y sanos, de manera sostenida en el tiempo, y promover al mismo tiempo la salud humana y animal, sin deterioro de los recursos naturales. Para [9], la calidad del suelo es definida como la capacidad continua para funcionar como un sistema

activo dentro de los límites del ecosistema y el uso del suelo, el cual debe mantener la producción biológica, promover la calidad del aire y del agua, así como conservar plantas, animales y la salud humana.

Otros autores indican que el indicador más relevante de la calidad del suelo es el contenido de materia orgánica (MO) [10]. De igual manera, la caracterización de diferentes fracciones de MO (activas, pasivas y lentas) son reconocidas como indicadores de buena calidad del suelo y su resiliencia. Además de que el sostenimiento de la calidad del suelo es crítico, también es conveniente una adecuada elección de indicadores de calidad para una rápida respuesta a diferentes cambios, una clara discriminación entre sistemas de manejo, una mayor sensibilidad al estrés y restauración ambiental, así como la caracterización de la variabilidad espacial y temporal [11].

Considerando que los suelos del piedemonte y de la altillanura colombiana, son propensos a la degradación por uso, debido a que son superficiales, presentan sellamiento superficial y poca permeabilidad e infiltración [1] el objetivo del presente estudio fue evaluar la incidencia de diferentes usos y ocupaciones en las propiedades físicas en un suelo del piedemonte llanero, para la determinación de indicadores de calidad.

2. Materiales y Métodos

2.1. Características del Área de Estudio

El estudio se desarrolló en el C.I. La Libertad de la Corporación Colombiana Agropecuaria (AGROSAVIA), ubicado a 330 m de altitud, con latitud norte de 4^0 04' y longitud oeste de 73º 30`. La zona presenta un clima tropical con temperatura media de 26 °C, precipitación media anual de 2700 mm y una humedad relativa media de 85%. Esta zona está conformada por terrazas aluviales de topografía ligeramente plana, en donde se han desarrollado suelos Oxisoles con predominio de arcillas caolinitas y cuarzo, provenientes de sedimentos del pleistoceno reciente al holoceno antiguo. La vegetación natural pertenece al bosque húmedo tropical según el sistema Holdridge, siendo que en la actualidad se ha eliminado para establecer diferentes sistemas productivos. En esta zona los suelos nativos son muy fuertemente ácidos (pH< 4.5), presentando alta saturación de aluminio (>70%) y baja saturación de bases (< 25%). También poseen baja disponibilidad de fosforo (1 ppm), calcio, potasio y magnesio, así como deficiencia de elementos menores, a excepción del hierro [12].

Los suelos de la zona de estudio se encuentran divididos en terrazas altas, medias y bajas, de acuerdo a su geomorfología. Las terraza alta y media fueron sabanas

tropicales con pastos nativos y la terraza baja, incluyendo la zona de influencia del rio Ocoa y de los caños, estaban cubiertas por bosque de galería. Esta condición se modificó a medida que los suelos fueron incorporados a la producción agropecuaria. En la terraza baja y media se establecieron cultivos de arroz, mientras que en las terrazas alta y parte de la media se establecieron pasturas del género Brachiaria. Posteriormente los cultivos de arroz se reemplazaron por pasturas de *Brachiaria decumbens* y después de que estas empezaron a degradarse, se inició un proceso de renovación de las pasturas mediante la incorporación de cultivos agrícolas transitorio (maíz, sorgo dulce, yuca, frijol caupí y soya), así como abonos verdes.

2.2. Selección de los usos y ocupaciones del suelo y toma de muestras

Para la realización del presente estudio se seleccionaron diez usos y ocupaciones del suelo, típicos de la zona de estudio y en cada uno de ellos se tomaron cuatro (4) sitios representativos, los cuales se indican en la Tabla 1. En estos sitios se realizaron calicatas donde se tomaron muestras en los dos primeros horizontes para llevar al laboratorio y determinar las propiedades físicas. Además, se realizaron pruebas en campo de resistencia mecánica a la penetración con un penetrómetro de cono Eijkelkamp de 20 cm de base y ángulo de 60° y pruebas de infiltración mediante anillos concéntricos, de cuyo ensayo se estableció la infiltración básica (Ib). En cada lote se tomaron muestras y se en laboratorio se determinó los contenidos de arena, limo y arcilla por el método de la pipeta; densidad real (Dr) mediante el método del picnómetro. Se tomó una muestra inalterada en un cilindro de 5 cm de diámetro y 3 cm de alto, para determinar la densidad aparente (Da), porosidad total (PT), lámina de agua aprovechable (LAA) y conductividad hidráulica saturada (Ks). La lámina de agua aprovechable se determinó a partir de la curva de retención de humedad que se obtuvo en ollas de presión y la conductividad hidráulica saturada se obtuvo mediante el método de cabeza constante. Para definir la estabilidad de los suelos, se utilizó el método de Yoder, cuyos resultados se usaron para determinar la estabilidad de agregados (EdeA) y el diámetro medio ponderado (DMP)

Tabla 1. Usos/Ocupaciones seleccionados.

Uso/ocupación	**Profundidad horizonte (cm)**		**Ubicación**	
	H1	**H2**	**Latitud**	**Longitud**
Cultivos Transitorios	0 - 37	37 - 63	4°-03,83'	73° 26,91
Caucho	0 - 41	41 - 65	4°-03,86'	73° 26,93'
Plátano - Maíz	0 - 33	33 - 49	4°-03,61'	73° 27,71'

Palma (18 años)	0 - 32	32 - 54	4°-03,55'	73° 27,75'
Pasto Toledo	0 - 26	26 - 49	4° 03,45'	73° 28,41'
Pasto bachearía	0 - 35	35 - 64	4° 03,42'	73° 28,19'
Cultivo de Cítricos	0 - 41	41 - 61	4° 03,63'	73° 27,53'
Cultivo de Mango	0 - 39	39 - 61	4° 03,44'	73° 28,02'
Plantación Forestal	0 - 25	25 - 44	4° 05,06'	73° 26.59'
Cultivo de Marañón	0 - 28	28 - 52	4° 03,38'	73° 28,45'

Nota: **H1** -horizonte 1; **H2** horizonte 2.

2.3. Procesamiento de datos

Los resultados obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA), para verificar los efectos sobre las variables de respuesta medidas. Para detallar la diferencia entre usos/ocupaciones se aplicó un test de Duncan, encontrando la diferencia entre medias de los usos/ocupaciones. De igual forma se analizó la correlación de Pearson entre las propiedades en estudio. Para estos análisis se aplicó el programa estadístico SPSS v.17 (SPSS Inc., Chicago, IL).

3. Resultados y discusión

Los suelos estudiados, presentan altos contenidos de arena, con contenidos de esta fracción alrededor del 45%, de acuerdo al análisis de granulometría por pipeta (Tabla 2). En general, las muestras analizadas presentan una textura entre franco arcillosa y franco arcillo arenosa para el primer horizonte y de franco arcillosa a arcillo arenosa para el segundo horizonte, denotando un mayor contenido de arcilla en el segundo horizonte. Las zonas con menor contenido de arena corresponden a la plantación forestal y al cultivo de marañón para el primer horizonte, zonas que presentaron diferencias significativas respecto del pasto brachiaria y palma.

Tabla 2. Valores medios de los contenidos (%) de arena, limo y arcilla, para diferentes usos y ocupaciones, en los primeros dos horizontes.

Uso / ocupación	**Horizonte 1**			**Horizonte 2**		
	Arena	**Limo**	**Arcilla**	**Arena**	**Limo**	**Arcilla**
Cultivos Transitorios	45,92^{abc}	22,01^{a}	32,08^{abc}	46,96^{bc}	16,10^{a}	36,94^{a}
Caucho	48,70^{abc}	16,40^{a}	34,90^{abc}	45,30^{abc}	15,43^{a}	39,27^{a}
Plátano - Maíz	44,08^{ab}	16,55^{a}	39,38^{bc}	48,85^{c}	16,17^{a}	34,99^{a}
Palma (18 años)	53,64^{c}	15,55^{a}	30,81^{ab}	48,14^{bc}	16,30^{a}	35,57^{a}
Pasto Toledo	44,52^{ab}	17,82^{a}	37,6^{6abc}	43,15^{abc}	18,50^{a}	38,35^{a}

Pasto Brachiaria	51,73^{bc}	18,68^{a}	29,59^{a}	45,71^{abc}	17,04^{a}	37,26^{a}
Cultivo de Cítricos	46,18^{abc}	21,07^{a}	32,75^{abc}	41,86^{abc}	16,90^{a}	41,24^{a}
Cultivo de Mango	44,87^{ab}	14,72^{a}	40,41^{bc}	39,27^{ab}	17,06^{a}	43,67^{a}
Plantación Forestal	42,30^{a}	24,39^{a}	33,31^{abc}	36,93^{a}	23,58^{b}	39,50^{a}
Cultivo de Marañón	43,30^{a}	18,69^{a}	38,01^{abc}	44,44^{abc}	18,37^{a}	37,20^{a}

Nota: Letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas entre los diferentes usos y ocupaciones.

El valor medio de Da para el primer horizonte es de 1,64 g.cm^{-3}, valor que indica posibles limitaciones de compactación. En el horizonte dos el promedio es de 1,65 g.cm^{-3} (Tabla 3). La Da oscila entre 1,61 y 1,66 g.cm^{-3} para el horizonte uno, observándose que no hay diferencias significativas de Da en los diferentes usos y ocupaciones estudiados. Para el horizonte dos, la ocupación con cultivos transitorios presentó el mayor valor (1,70 g.cm^{-3}) y presenta diferencia significativa con el pasto brachiaria (1,60 g.cm^{-3}). Cabe resaltar que en algunos suelos los valores para los horizontes superiores son menores, debido a la influencia de la materia orgánica y la presencia de raíces, mientras que aumenta ligeramente para el horizonte dos.

Los valores medio de Dr fueron de 2,61 g.cm^{-3} para el horizonte uno y de 2,62 g.cm^{-3} para el horizonte dos, valores que corresponde con los minerales presentes del suelo, compuesto principalmente por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, caolinita y cuarzo. La diferencia entre Dr y Da está relacionada por la PT y por tanto es una medida del nivel de compactación y facilidad del desarrollo radicular. La mayoría de los usos estudiados presentaron porosidad total inferior al 50%, a excepción los usos/ocupaciones pasto Toledo y pasto bachearía que presentaron valores superiores del 60% en ambos horizontes. Estos resultados indican que los suelos presentan una aireación deficiente, con drenaje entre moderado y malo.

Los valores de infiltración básica variaron entre 0,20 y 0,29 cm.h^{-1}. La mayor infiltración básica se observó en el uso/ocupación plátano-maíz, que presentó diferencia significativa respecto a cultivo de mango y del pasto brachiara (Tabla 4), zonas que presentaron los menores valores de infiltración básica. En general se observó que para los suelos donde se realizan prácticas de labranza (cultivos transitorios, plátano-maíz, cultivo de cítricos), la infiltración básica es mayor, dado que esta práctica permite aireación y afecta los agregados del suelo. Con base en lo que expone, la infiltración del suelo y su variación con el tiempo depende de la humedad al momento de realizar la prueba, así como de la capacidad de succión, la textura, la estructura, y la uniformidad (o secuencia de capas) del perfil [13].

Tabla 3. Valores medios de densidad aparente (Da), densidad real (Dr) y porosidad total (PT), para diferentes usos y ocupaciones, en los primeros dos horizontes.

Uso / ocupación	Horizonte 1			Horizonte 2		
	Da, g cm^{-3}	Dr, g cm^{-3}	PT, %	Da, g cm^{-3}	Dr, g cm^{-3}	PT, %
Cultivos Transitorios	1,66^{a}	2,62^{d}	31,43^{a}	1,70^{b}	2,64^{a}	36,99^{ab}
Caucho	1,65^{a}	2,64^{d}	36,65^{a}	1,68^{ab}	2,58^{a}	27,78^{a}
Plátano - Maíz	1,62^{a}	2,63^{d}	41,29^{ab}	1,61^{ab}	2,68^{a}	70,73^{cd}
Palma (18 años)	1,65^{a}	2,62^{cd}	36,19^{a}	1,63^{ab}	2,63^{a}	61,17^{bcd}
Pasto Toledo	1,62^{a}	2,60^{abcd}	65,86^{bc}	1,65^{ab}	2,62^{a}	74,09^{cd}
Pasto Brachiaria	1,65^{a}	2,62^{cd}	76,99^{c}	1,60^{a}	2,56^{a}	85,22^{d}
Cultivo de Cítricos	1,61^{a}	2,58^{a}	38,95^{ab}	1,64^{ab}	2,62^{a}	40,04^{a}
Cultivo de Mango	1,65^{a}	2,61^{bcd}	42,95^{ab}	1,64^{ab}	2,63^{a}	61,04^{ab}
Plantación Forestal	1,66^{a}	2,58^{ab}	34,05^{a}	1,68^{ab}	2,64^{a}	43,80^{a}
Cultivo de Marañón	1,65^{a}	2,59^{abc}	28,60^{a}	1,64^{ab}	2,60^{a}	34,83^{ab}

Nota: **Da**-densidad aparente; **Dr**-densidad real; **PT**-porosidad total. Letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas entre los diferentes usos y ocupaciones.

La lámina de agua aprovechable (LAA) varió entre 37,90 y 55,90 mm para el primer horizonte y en el segundo está entre 20,41 y 42,67 cm, correspondiendo con la clase textural encontraba en los diferentes usos y ocupaciones estudiados. Esto significa que el suelo posee una buena capacidad de retención de agua en un tiempo de forma que la planta pueda adsorber los nutrientes y se desarrolle de manera adecuada. Se resalta que entre los diferentes usos/ocupaciones no hubo diferencias significativas.

De acuerdo a los valores encontrados para Ks, se observaron conductividades entre moderadas a moderadamente rápidas para los usos de caucho, palma (18 años), cultivo de cítricos, pasto toledo, pasto brachiaria y cultivo de mango. Para los restantes usos la Ks está entre rápida y muy rápida. Lo anterior permite deducir que para algunas zonas se pueden presentar problemas de encharcamiento (conductividad moderada), mientas que para las rápidas a muy rápidas puede presentarse problemas de lavado de nutrientes.

Tabla 4. Valores medios de infiltración básica (Ib, cm h^{-1}), lámina de agua aprovechable (LA, mm) y conductividad hidráulica saturada (Ks, cm h^{-1}), para diferentes usos y ocupaciones, en los primeros dos horizontes.

Uso / ocupación	Horizonte 1			Horizonte 2	
	Ib	LAA	Ks	LAA	Ks
Cultivos Transitorios	0,26^{abcd}	52,57^{a}	43,47^{a}	37,19^{a}	33,19^{ab}
Caucho	0,26^{abcd}	54,45^{a}	22,65^{a}	26,42^{a}	59,40^{ab}
Plátano - Maíz	0,29^{d}	44,23^{a}	43,94^{a}	20,41^{a}	3,21^{a}
Palma (18 años)	0,28^{abcd}	45,47^{a}	14,90^{a}	30,35^{a}	3,17^{a}
Pasto Toledo	0,26^{abcd}	41,89^{a}	13,98^{a}	35,39^{a}	2,03^{a}
Pasto Brachiaria	0,25^{abc}	55,90^{a}	8,19^{a}	42,67^{a}	3,08^{a}
Cultivo de Cítricos	0,27^{abcd}	54,77^{a}	9,50^{a}	26,73^{a}	6,62^{a}
Cultivo de Mango	0,23^{a}	55,42^{a}	13,60^{a}	33,25^{a}	14,52^{a}
Plantación Forestal	0,24^{ab}	37,90^{a}	119,26^{a}	28,07^{a}	13,15^{a}
Cultivo de Marañón	0,27^{abc}	47,16^{a}	59,26^{a}	27,43^{a}	5,39^{a}

Nota: **Ib**-infiltración básica; **LAA**-lámina de agua aprovechable; **Ks**-conductividad hidráulica saturada. Letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas entre los diferentes usos y ocupaciones.

La RP presenta valores superiores de 2,0 MPa, para todos los usos y ocupaciones, lo cual indica que estos suelos pueden presentar limitaciones para el desarrollo radicular de las plantas (Tabla 5). Los valores son mayores en el horizonte dos, que varía entre 2,10 y 2,50 MPa que en el horizonte uno. Las zonas con cultivos transitorios y con cultivos de marañón, presentaron los menores valores en el horizonte uno, situación similar observada para el horizonte dos, siendo significativamente diferentes respecto a los otros usos y ocupaciones.

La EdeA fue moderadamente estable para la mayoría de usos y ocupaciones en el primer horizonte y entre moderadamente estable y estables para el segundo horizonte. Estos resultados concuerdan con los reportados por [14, 15], para la zona de estudio. Otra manera de analizar la EdeA, es a través del DMP, lo que nos permite visualizar la homogeneidad de los agregados. Los valores de DMP para el primer horizonte se encuentran entre 119,26 y 8,19 mm siendo el más alto para la plantación forestal, para el segundo horizonte varía entre 59,40 y 2,03.

Tabla 5. Valores medios de resistencia a la penetración (RP, MPa), estabilidad de agregados (EdeA) y diámetro medio ponderado (DMP, mm), para diferentes usos y ocupaciones, en los primeros dos horizontes.

Uso / ocupación	Horizonte 1			Horizonte 2		
	RP, MPa	EdeA,	DMP	RP, MPa	EdeA,	DMP
Cultivos Transitorios	2,05^{bc}	89,10^{a}	43,47^{b}	2,01^{a}	85,80^{ab}	33,19^{ab}
Caucho	2,24^{abc}	82,05^{a}	22,65^{b}	2,36^{ab}	76,44^{ab}	59,40^{ab}
Plátano - Maíz	2,33^{bc}	79,52^{a}	43,94^{a}	2,38^{ab}	67,12^{a}	3,21^{ab}
Palma (18 años)	2,45^{c}	83,38^{a}	14,90^{b}	2,40^{ab}	78,69^{ab}	3,17^{ab}
Pasto Toledo	2,33^{bc}	90,24a	13,98^{b}	2,40^{ab}	85,16^{ab}	2,03^{ab}
Pasto Brachiaria	2,09^{ab}	87,45^{a}	8,19^{b}	2,43^{ab}	82,62^{ab}	3,08^{ab}
Cultivo de Cítricos	2,43^{c}	78,97^{a}	9,50^{b}	2,50^{b}	73,61^{a}	6,62^{a}
Cultivo de Mango	2,48^{c}	84,92^{a}	13,60^{b}	2,50^{b}	80,50^{ab}	14,52^{ab}
Plantación Forestal	2,26a^{bc}	91,95^{a}	119,26^{b}	2,45^{ab}	92,84^{a}	13,15^{a}
Cultivo de Marañón	2,03^{a}	86,32^{a}	59,26^{b}	2,08^{ab}	82,42^{ab}	5,39^{ab}

Nota: **RP**-resistencia a la penetración; **EdeA**-estabilidad de agregados; **DMP** - diámetro medio ponderado. Letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas entre los diferentes usos y ocupaciones.

Con el fin de analizar el comportamiento y relación entre las propiedades físicas del suelo, se sometió los datos al análisis de correlación por medio del coeficiente de Pearson, para los dos horizontes estudiados. La Tabla 6 presenta los resultados del análisis de correlación entre las propiedades físicas para H1, encontrándose correlaciones positivas entre Da y EdeA; entre el limo, Ks y EdeA, así como entre LAA provechable y PT; la EdeA y DMP. Estas correlaciones resultan lógicas, debido a que los valores de Da, de EdeA y de DMP, aumentan directamente proporcional. Por otra parte, los valores de PT inciden en la disponibilidad del agua en el suelo lo que se manifiesta en altos niveles de Ks y de LAA, como también es reportado por [16].

Para el caso de las relaciones negativas, se encuentra relación significativa entre, la arena, el limo y la arcilla, la Da y PT, siendo de relación inversa a medida que la densidad aumenta la porosidad disminuye. Este comportamiento se debe a que el contenido de arcilla es inferior a los contenidos de arena y limo como lo reportó [17, 18]. En la Tabla 7, se presenta las correlaciones para las propiedades físicas para H2, encontrándose un comportamiento similar a H1, donde la arena presenta correlaciones inversas con el contenido de arcilla y la EdeA, observándose en que la textura del suelo afecta la estabilidad de agregados, principalmente en H2.

Tabla 6. Correlaciones de las propiedades Físicas para el primer horizonte.

Propiedad	L	Ar	Da	Dr	LAA	Ib	Ks	RP	PT	EdeA	DMP
A	-0,47**	-0,47**	0,01	0,26	-0,07	-0,07	-0,16	-0,08	0,19	-0,38*	0,28
L	1	-0,56**	0,30*	0,02	-0,19	-0,103	0,32*	0,18	-0,11	0,32*	0,15
Ar		1	-	0,01	0,25	-0,03	-0,17	-0,10	0,02	0,04	-0,10
Da			1	0,21	0,01	0,09	0,14	0,08	-0,30*	0,33*	0,28
Dr				1	0,09	0,00	-0,04	-0,04	0,02	0,65**	-0,26
LAA					1	-0,13	-0,15	0,00	0,27	0,17	0,09
Ib						1	-0,15	0,00	0,27	0,17	0,09
Ks							1	0,15	-0,29	0,06	-0,06
RP								1	-0,13	-0,03	0,05
PT									1	0,02	0,09
EdeA										1	0,65**

Nota: **A**-contenido de arena; **L**-contenido de limo; **Ar**-contenido de arcilla; **Da**-densidad aparente; **Dr**-densidad real; **LAA**-lámina de agua aprovechable; **Ib**-infiltración básica; **Ks**-conductividad hidráulica saturada; **RP**-resistencia a la penetración; **PT**-porosidad total; **EdeA**-estabilidad de agregados; **DMP** - diámetro medio ponderado.

Tabla 7. Correlaciones de las propiedades Físicas para el segundo horizonte.

Propiedad	L	Ar	Da	Dr	LAA	Ks	RP	PT	EdeA	DMP
A	-0,60	-0,83**	-0,09	-0,03	0,11	-0,13	-0,20	0,14	-0,31*	-0,05
L	1	-0,30*	0,26	0,01	0,16	-0,00	0,21	0,13	0,25	-0,02
Ar		1	-0,09	-0,03	0,11	0,13	0,08	-0,22	0,17	0,06
Da			1	0,05	-0,05	0,28	-0,31*	-0,26	0,12	0,02
Dr				1	-0,38*	-0,29	0,02	0,02	0,06	0,19
LAA					1	0,21	-0,07	0,28	0,08	-0,25
Ks						1	-0,27	-0,23	0,05	-0,03
RP							1	0,26	-0,08	0,06
PT								1	0,09	-0,06
EdeA									1	0,44**

Nota: **A**-contenido de arena; **L**-contenido de limo; **Ar**-contenido de arcilla; **Da**-densidad aparente; **Dr**-densidad real; **LAA**-lámina de agua aprovechable; **Ib**-infiltración básica; **Ks**-conductividad hidráulica saturada; **RP**-resistencia a la penetración; **PT**-porosidad total; **EdeA**-estabilidad de agregados; **DMP** - diámetro medio ponderado.

4. Conclusiones

Para la zona de estudio se observó una relación directa entre los diferentes usos/ocupaciones de los suelos y los cambios de las características de los suelos, influyendo en la variación de calidad de los suelos. Al caracterizar los suelos de la zona de estudio, se encuentra que su oferta es baja ya que presentan, bajos niveles de retención de agua, valores medio a altos de densidad aparente que lleva a pensar en la susceptibilidad a la compactación.

Los indicadores propuestos son adecuados para monitorear la calidad química y física del suelo, porque son fácil de medir y son sensibles a variaciones de manejo y clima. Además, con la clasificación cuantitativa realizada la valorización es muy sencilla de hacer tanto para científicos como para agricultores. Para el monitoreo de la calidad de suelos, las variables que mayor información del suelo pueden aportar son las físicas ya que su relación con el uso y manejo de los suelos es directa. Para este estudio la Da y PT, son las propiedades que mayor relevancia presentan en la calidad del suelo.

Referencias

1. Camacho-Tamayo, J.H; Rubiano Sanabria, Y.; Santana, L.M. Management units based on the physical properties of an Oxisol. Journal of soil science and plant nutrition, 2013, 13(4), 767-785, https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000061
2. Drewry, J.J.; McNeill, S.J.; McDowell, R.W.; Law, R.; Stevenson, B.A. Linking land value to indicators of soil quality and land use pressure, Geoderma, 2024, 450, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117054
3. Sarmiento Herrera, N.G.; Aguilar-Ariza, A.; Camacho-Tamayo, J.H. Identification of yield-limiting factors on maize production from observational data. Acta Agronómica, 2023, 72(3), 241-251. https://doi.org/10.15446/acag.v72n3.106012
4. Dexter, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth, Geoderma, 2004, 120 (3-4), 201-214, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004
5. Bautista Cruz, A.; Etchevers Barra, J.; del Castillo, R.; Gutiérrez, C. La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas, 2004, 13(2). Recuperado a partir de https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572
6. Silva, J.R.I.; Souza, R.; Souza, E.; Almeida, A.Q.; Lima, J.R.S.; Sales, A.T.; Menezes, R.S.C.; Antonino, A.C.D.; Calabrese, S.; Montenegro, S.M.G.L. Modeling the spatial distribution of soil physical properties in a semiarid tropical region, CATENA, 2024, 245, https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108311
7. Parr, J.F.; Papendick, R.I.; Hornick, S.B.; Meyer, R.E. Soil Quality: Attributes and Relationship to Alternative and Sustainable Agriculture. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7, 5-11. https://doi.org/10.1017/S0889189300004367
8. Astier Calderón, M.; Maass Moreno, M.; Etchevers Barra, J. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. Agrociencia, 2002, 36(5), 605-620.
9. Salazar, M.P.; Lozano, L.A.; Villarreal, R.; Irizar, A.B.; Barraco, M.; Polich, N.G.; Soracco, C.G. Capacity and Intensity Indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region, Soil and Tillage Research, 2022, 217, https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105268.
10. Velasquez, E.; Lavelle, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes, Acta Oecologica, 2019, 100, https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103446.

11. Martínez-García, L.B.; Korthals, G.; Brussaard, L.; Jørgensen, H.B.; Deyn, G.B. Organic management and cover crop species steer soil microbial community structure and functionality along with soil organic matter properties, Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 263, 7-17, https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.018.
12. Rincón C., A.; Bueno G., G.A.; Álvarez de León., M.; Pardo B., O.; Pérez L., O. y Caicedo G., S. Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos. 2010, Corpoica C.I. La libertad. Villavicencio, Meta. Colombia. 252p.
13. Varón-Ramírez, V.M.; Camacho-Tamayo, J.H.; González-Nivia, J. Management zones determination based on physical properties of the soil. Ciência & Agrotecnologia, 2018, 42, http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018423002318
14. Jamioy Orozco, D.D.; Menjivar Flores, J.C.; Rubiano Sanabria, Y. Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. Acta Agronómica, 2015, 64(4), 302-307. https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.38731
15. Rubiano Sanabria, Y..; Amézquita, E.; Beaulieau N. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad de suelos para los Llanos Orientales de Colombia. Estudio de caso: Municipio de Puerto López, Meta. Acta Agronómica, 2005, 54(3).
16. Cortés-Delgadillo, D.L.; Camacho Tamayo, J.H.; Giraldo, Ramón. Analysis and spatial prediction of water retention curves in two types of soil. Revista Brasileira de Engenharía Agrícola e Ambiental, 2024, 28(3). https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n3e277718
17. Orjuela-Matta H. M., Sanabria Y. R. & Camacho-Tamayo J. H. Spatial analysis of infiltration in an oxisol of the eastern plains of Colombia. Chilean Journal of Agricultural Research, 2012, 72 (3), 404–410. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000300015.
18. Da Silva Martins, A.L.; Gomes de Moura, E.; Camacho-Tamayo, J.H. Spatial variability of infiltration and its relationship to some physical properties. Ingeniería e Investigación, 2010, 30(2), 116-123. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000200012&lng=en&tlng=en.

Determinación del contenido de agua para tres tipos de suelos por medio de un modelo de predicción

Andrea Katherin Carranza-Díaz[1], Fernando Lozano-Osorno [1] y Jesús Hernán Camacho-Tamayo[1,*]

[1] Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia

* Correspondencia: jhcamachot@unal.edu.co

Resumen: Diferentes propiedades del suelo tienen una relación directa con el contenido de agua (WC). Por esto, determinar la humedad del suelo permite gestión adecuada de cultivos. El objetivo de este estudio fue calibrar un modelo de predicción espectral de tres suelos: un Oxisol del departamento del Meta, un Inceptisol del departamento de Cundinamarca y un Alfisol del departamento del Tolima, bajo tres contenidos de agua, equivalentes al 0%, 15% y 30%. Cada muestra fue llevada al contenido de agua deseado para posteriormente obtener su curva espectral. Se obtuvieron cuatro modelos, un modelo para cada orden de suelo y un cuarto modelo producto del conjunto de los tres suelos. Los modelos fueron calibrados a partir de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR). En los cuatro casos, se alcanzaron modelos con buena capacidad predictiva (R^2 superior al 0,85 y RMSE menor que 0,04). Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) el cual mostró una distinción notable entre WC para cada uno de los suelos y entre órdenes suelos. Los resultados permitieron encontrar que el uso de la espectroscopia de reflectancia difusa en el del infrarrojo cercano (NIR) es una opción adecuada para determinar el contenido de agua en el suelo.

Palabras clave: Respuesta espectral; agricultura de precisión; regresión de mínimos cuadrados parciales; análisis de componentes principales; infrarrojo Cercano.

1. Introducción

La teledetección presenta varias ventajas sobre otros métodos para determinar la humedad superficial del suelo, con una buena cobertura debido a la facilidad de realizar varios escaneos y su eficiencia de escala [1], ventajas que métodos usados comúnmente no tienen. La espectroscopía ha surgido para suplir los métodos tradicionales que determinan propiedades del suelo, presentando ventajas por no ser destructiva ni usar reactivos contaminantes, así como por su rapidez en tiempos de respuesta. Es un método eficaz para determinar diversas propiedades del suelo y una opción de bajo costo respecto a métodos convencionales por su alta eficiencia [2]. Por otra parte, un modelo confiable de la reflectancia del suelo a partir del

contenido de agua, mejoraría la capacidad para revelar otras características del suelo y la vegetación [3].

Una de las regiones en las que se divide el espectro es la zona del infrarrojo, la cual abarca la radiación de longitudes de onda comprendidos entre 0,78 a 1000 µm. Esta radiación es emitida por cuerpos que alcancen una temperatura igual o mayor que -273,15 ^{0}C (cero absoluto). El espectro infrarrojo se divide en infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR). Los espectros de absorción, emisión y reflexión en la zona del IR, pueden ser explicados si se considera que es la consecuencia de variados cambios energéticos que se originan en las transiciones de las moléculas, de cambios de estados de energía vibracionales y rotacionales [4].

La espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIR) se basa en los sobretonos y combinación de las vibraciones. Las bandas de absorción exhibidas en los espectros NIR, se producen principalmente debido a la vibración de tres grupos funcionales, es decir, -CH, -NH y –OH [5]. La aplicación más importante en el infrarrojo cercano es en la determinación de rutina de especies tales como agua.

En la determinación del contenido de agua del suelo, ocasionalmente presenta problemas para hallar la relación entre el cambio de albedo o de la reflectancia en bandas específicas de absorción de agua. Sin embargo, hay ensayos exitosos que implican la calibración de bandas espectrales al WC. En Colombia, se han realizado algunos estudios utilizando la espectroscopia como método de análisis de suelos [6, 7], sin embargo, son pocos los estudios reportados sobre la incidencia del contenido de agua en los suelos colombianos. Teniendo en cuenta la conceptualización previa y la importancia de la investigación, el objetivo de este estudio fue determinar y analizar la respuesta espectral de tres suelos de diferente orden, bajo tres contenidos de aguas para cada orden de suelo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Zona de estudio

Para el presente estudio se trabajó con tres suelos de diferente origen, de los cuales, dos fueron previamente extraídos y se contaba con las muestras en el laboratorio: un Oxisol proveniente del municipio de Puerto Gaitán (Meta), un Alfisol de la región del Espinal (Tolima) y un Inceptisol tomado del Centro Agropecuario Marengo, finca experimental de la Universidad Nacional de Colombia en el municipio de Mosquera (Cundinamarca). Las muestras disturbadas se recogieron en la mitad de los dos primeros horizontes de cada suelo. La Tabla 1 describe las generalidades de los suelos utilizados en el estudio.

Tabla 1. Características de los suelos utilizados en el estudio.

Orden de Suelo	Sitio	Latitud Longitud	Altitud, m	Clima medio
Alfisol	C.A. "La Granja" Espinal (Tolima)	4°10'17.6"N 74°55'44.4"W	312	Temperatura: 25°C Viento: 18 km/h Humedad: 59%
Inceptisol	C.A. Marengo Mosquera (Cundinamarca)	4°42'52.0"N 74°12'60.0"W	2516	Temperatura: 13 °C Viento: 8 km/h Humedad: 68%
Oxisol	C.I. Carimagua Puerto Gaitán (Meta)	4°34'01.6"N 71°19'58.0"W	170	Temperatura: 31°C Viento: 18 km/h Humedad: 59%

2.2. Determinación del contenido de agua WC

Las muestras fueron secadas a 35°C durante 72 h, hasta que alcanzaran la humedad de equilibrio. Posteriormente las muestras fueron molidas y tamizadas por una malla de 2 mm, con el fin de homogenizarlas y remover el material detrítico.

Para cada muestra se analizó tres contenidos de agua, correspondiente al 0%, 15%, 30%. Se tomó 100 g de cada muestra y se secó a 60°C durante 48 h, con el fin de homogenizar las muestras en un contenido de agua cercano a 0%. Luego se procedió a obtener las curvas espectrales en la región NIR (1000 – 2500 nm), para lo cual se usó un espectrómetro FT-NIR (NIRFLex N500, Büchi Labortechnik, Suiza), con una resolución de 8 cm-1. Para cada muestra se tomó una lectura con 32 scans. La determinación de la cantidad de agua a añadir al suelo se realizó de acuerdo a la Ecuación 1, para alcanzar contenidos del 15% y 30%, lo cual se hizo sobre la muestra extendida y con un atomizador. Luego, cada muestra fue cubierta con papel film y depositada en bolsas herméticas con el fin de minimizar cualquier alteración en el contenido de agua. Las curvas espectrales se adquirieron después de cerca de 24 horas para garantizar que el agua se distribuyera homogéneamente en la muestra. Después de la toma de espectros, en una submuestra de suelo se determinó de manera convencional el contenido de agua, secándola por 24 h a 105°C y así calcular la humedad gravimétrica del suelo. Si bien algunos autores reportan la determinación de del contenido volumétrico de agua, ya que afirman que es una medición más adecuada para estudiar la reflectancia [3], otros autores recurren a la determinación termogravimétrica. En el presente estudio, la determinación del contenido de agua se realizó a partir de la Ecuación 1, con base en la norma I.N.V. E – 122 – 13.

$$ca_{apl} = m_T\left(\frac{\omega_d+1}{\omega_i+1}-1\right)$$ Ecuación 1

donde, caapl es el peso total de agua a adicionar a la muestra (g; mT el peso total de la muestra (g); ωd el contenido de agua (%) al que se desea llegar en la muestra; ωi el contenido de agua (%) inicial de la muestra, determinado previamente por el método de la estufa.

2.3. Análisis estadístico descriptivo

A los resultados obtenidos de los contenidos de agua a partir de las pruebas convencionales, se les aplicó la prueba de Grubbs ($p<0.05$) para identificar la presencia de datos atípicos y proceder a su análisis y posible eliminación. Luego se realizó un análisis de estadística descriptiva donde se determinó la media, valor máximo, valor mínimo. desviación estándar (SD) y el coeficiente de varianza (CV) para cada orden de suelo y sus correspondientes contenidos de agua. Estas pruebas fueron realizadas con el paquete estadístico GraphPad Prism 8.3.0.

2.4. Procesamiento y análisis de curvas espectrales

De las muestras que finalmente se analizaron y pasaron la prueba de Grubbs, el 75% fueron utilizadas para la calibración del modelo, mientas que el 25% restante, fueron utilizadas para la validación. Teniendo en cuenta que la obtención de las curvas espectrales puede presentar efectos de dispersión y ruido, se realizaron tratamientos de corrección como la derivada de Savitzky – Golay, SNV (Standard Normal Variation) y Normalización. Para la calibración los modelos se utilizó la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) considerando la ecuación descrita por [8]. Para esto, se aplicó el algoritmo iterativo no lineal de mínimos cuadrados parciales (NIPALS). Igualmente, dentro del procedimiento de análisis espectral para la identificación de datos atípicos, se definieron los parámetros de un residual tipo F y se utilizó una distribución tipo T2 de Hotelling, como medida de cuán lejanos están los valores de las variables independientes de una observación respecto de las otras observaciones.

Para la calibración del modelo con el mejor ajuste, se consideró el error medio (ME), la desviación estándar del error (SDE), la raíz del error cuadrático medio de la predicción (RMSE), el coeficiente de variación (CV), sesgo y desviación residual de la predicción (RPD). Asimismo, se utilizó el resultado de la validación de los modelos como criterio para determinar el número de factores PLSR.

La validación de los modelos se realizó considerando el coeficiente de determinación para el grupo de datos de la validación (R2), así como el error estándar para el grupo de validación. También se usaron pesos de carga para la

determinación de longitudes de índice significativas en la predicción del contenido de agua, ya que permiten verificar la influencia de las bandas en la variable.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis descriptivo

Una vez aplicada la prueba de Grubbs, se definió tanto el grupo de calibración como de validación. La selección de los datos para cada grupo y para cada tipo de suelo se realizó aleatoriamente y de forma equitativa, para asegurar así que los parámetros estadísticos de cada uno fueran similares, es decir que los contenidos de agua para cada tipo de suelo fueran cercanos a 0%, 15% y 20%. Como se observa en la Tabla 2, este objetivo se logró, como también lo indican los valores cercanos a cero de SD y CV, para cada tipo de suelo y contenido de agua analizado.

Tabla 2. Análisis de estadística descriptiva para los resultados de pruebas convencionales.

Suelo	CAS (%)	grupo	Media (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	SD	CV (%)
Inceptisol	0	Calibración	2,74	5,41	0,95	0,01	0,36
		Validación	2,71	5,56	0,95	0,01	0,36
	15	Calibración	14,80	22,64	11,00	0,02	0,11
		Validación	14,78	21,04	12,63	0,01	0,09
	30	Calibración	27,84	34,67	25,13	0,01	0,04
		Validación	27,96	29,86	24,94	0,01	0,04
Alfisol	0	Calibración	0,38	1,02	0,00	0,00	0,59
		Validación	0,36	0,83	0,01	0,00	0,61
	15	Calibración	13,62	18,49	10,97	0,01	0,09
		Validación	13,75	18,51	11,00	0,01	0,09
	30	Calibración	28,70	36,13	23,33	0,03	0,10
		Validación	28,92	31,84	23,59	0,02	0,08
Oxisol	0	Calibración	1,10	2,05	0,66	0,00	0,21
		Validación	1,12	1,39	0,65	0,00	0,16
	15	Calibración	13,27	14,59	10,11	0,01	0,07
		Validación	13,54	15,71	11,90	0,01	0,06
	30	Calibración	29,72	38,12	24,75	0,02	0,07
		Validación	29,70	41,11	26,57	0,03	0,10

3.2 Descripción de las curvas espectrales obtenidas

Diferentes formas de agua contenidas en el suelo se manifiestan claramente en el espectro del infrarrojo cercano. Esto se observa en sobretonos y fundamentos de las frecuencias fundamentales de vibración de H2O presentes en las curvas espectrales, estiramiento simétrico y asimétrico de -OH y flexión de -OH [9]. La cuantificación del contenido de agua en el suelo con espectroscopía en el infrarrojo, se basa en los sobretonos existentes de las bandas de absorción de agua a 1450,

1950 y 2950 nm [10] (Figura 1), que resultan de la resonancia en la vibración molecular de la molécula de agua iluminada [11], comportamiento que se puede verificar en la Figura 1. Igualmente, se han identificado bandas asignadas a las vibraciones respecto al estiramiento y flexión de enlaces de agua e hidróxido, así como las fuerzas relativas de absorción de energía [12]. Estos autores definieron que, a los 1400 y 1998 nm, se encuentran fuerzas de absorción de agua muy fuertes, mientras que, a los 1200 nm, se encuentras fuerzas fuertes y a los 986 nm, fuerzas muy débiles. Debido al rango que el equipo utilizado maneja, fueron analizadas las longitudes de onda 1450 y 1950 nm.

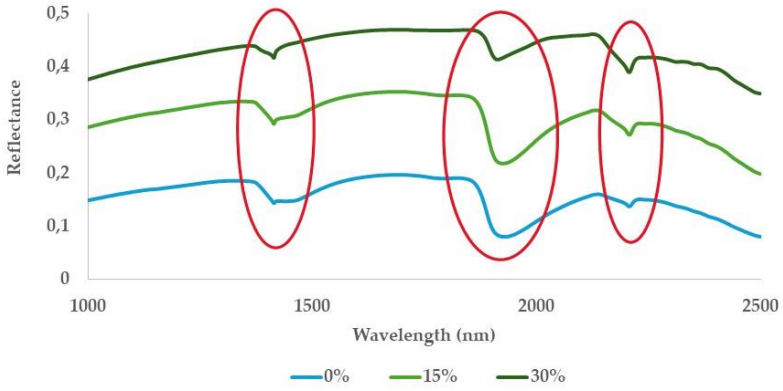


Figura 1. Picos de grupos -OH en el espectro de reflectancia encontrados para suelos con diferentes contenidos de agua.

La reflectancia de los suelos analizados mostró tendencias similares en función de los contenidos de agua del suelo, sin importa la profundidad en que fue tomada la muestra. Por ejemplo, en la Figura 2 se observa que, para los tres tipos de suelo, existe la misma tendencia respecto a la disminución de la reflectancia, en todas las longitudes de onda, a medida que crece el contenido de agua. De igual manera, se observó que la pendiente de la curva espectral aumenta en el rango comprendido entre 1350 nm y 1450 nm, así como en el rango entre 1850 nm y 2000 nm. Estas tendencias corresponden con los sobretonos existentes de las bandas de absorción de agua, como también es reportado por otros autores [13]. Para los suelos se observó una pendiente más fuerte en la región de los 2200 nm para el contenido de agua de 15%, que corresponde con lo descrito por [14], autores que reportan la disminución del albedo con el aumento del CAS es más evidente hasta que el contenido de agua de 15%. Cuando el contenido de agua del suelo aumenta, las fracciones del suelo absorben el agua, para luego llenar de agua los microporos y los mesoporos (condición de capacidad de campo), lo que causa en las longitudes de onda un cambio de la refractividad relativa en la superficie de las fracciones del suelo, especialmente cuando son mayores los contenidos de materia orgánica [14], mientras que presenta poco efecto sobre la reflectancia cuando el agua recubre los microporos y los macroporos [15]. Las longitudes de onda más largas pueden

absorber fuertemente el agua ocasionando un cambio significativo en la reflectancia, incluso cuando el contenido de agua está en la capacidad de campo [3].

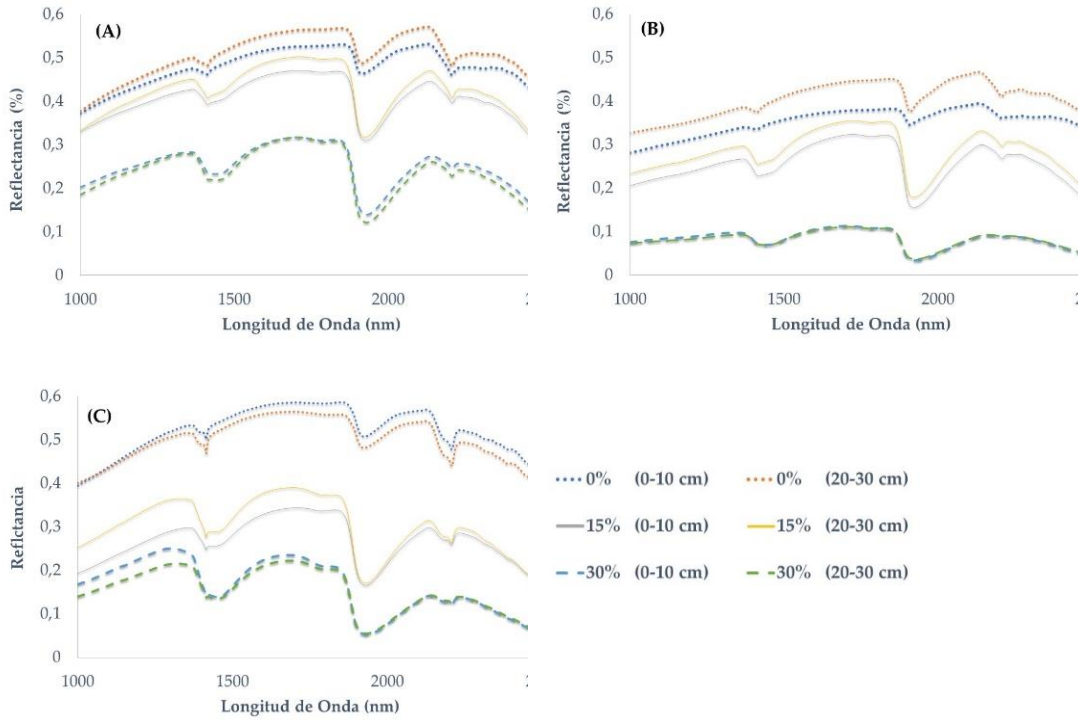


Figura 2. Reflectancia media para las dos profundidades estudiadas de los suelos en función del contenido de agua de los diferentes sitios en estudio. (A) Centro Agropecuario Marengo (Inceptisol); (B) Centro Agropecuario La Granja (Alfisol); (C) Centro de Investigación Carimagua (Oxisol).

En el Inceptisol, se verificó que predomina la clase textural franco arcillo-limosa, cuya mineralogía está compuesta principalmente por familias caoliníticas y mezclada (no se encontró algún mineral dominando la fracción arcilla). La caolinita presenta picos de reflectancia entre longitudes de ondas cercana a 2200 nm, debido a los grupos Al-OH, mientras que, a los 1400 nm se presenta debido al sobretono OH [16]. El Alfisol posee suelos con clase textural predominante franco-arenosa con una mineralogía compuesta por gibsita y caolinita [17], siendo que la gibsita presenta el mayor pico de reflectancia entre 2200 nm y 2300 nm [18]. Finalmente, la clase textural predominante en el Oxisol es franco arcilloso, en la cual el mineral predominante es la caolinita [19]. La absorción de minerales arcillosos se debe especialmente a los sobretonos OH, H2O y CO3 [16]. El agua asociada en la red de algunos minerales arcillosos se absorbe fuertemente en las longitudes de onda de 1400 nm y 1900 nm, lo cual está relacionado con la composición mineralógica del suelo [16]. Por otra parte, otros autores también reportan que la contracción que presenta la caolinita en suelos arcillosos, en el proceso de secado, disminuye e la reflectancia respecto a suelos arenosos [20].

En los tres tipos de suelos se observa que la reflectancia mantiene la tendencia descrita previamente y que disminuye cuando aumenta el contenido de agua. También se observó que los picos característicos de las respuestas espectrales para suelos tienden a suavizarse a medida que el contenido de agua aumenta en ellos. Esto concuerda con lo encontrado por [21], autores que afirman que el contenido de agua del suelo, suaviza las principales absorciones espectrales del suelo y distorsiona la curva espectral general. El contenido de agua en el suelo influye en la respuesta espectral al reducir el albedo general y al aumentar la absorción de agua, lo cual se manifiesta en los picos de 1400 nm, 1900 nm y entre 2300–2500 nm [3, 21].

3.3. Calibración de modelos

Respecto a la calibración de los modelos digitales para determinar el contenido de agua, se obtuvieron modelos altamente predictivos para los tres suelos, como se puede observar en los coeficientes de regresión, además de presentar RMSE adecuados (Tabla 3). Para los suelos procedentes del CAM y del CIC, se encontraron coeficientes de regresión (R2) de 0,97 y 0,95 para los modelos de calibración y validación respectivamente, lo que indica una correlación alta. Estos resultados coinciden con lo reportado por [23], autores que reportaron un R2 de 0,98, así como con [24] quienes también reportaron un de R2 de 0,82, para determinar el contenido de agua. Por su parte, los suelos originarios del CAG, aunque presentaron coeficientes de regresión adecuados (R2), fueron un poco más bajos que los reportados en diferentes trabajos.

Por otra parte, se observó que el modelo del CAM presentó en el modelo calibrado un RMSE de 0,02, valor menor al reportado por [12], autores que obtuvieron un RMSE de calibración de 0,031. Para el CIC se obtuvo un modelo de calibración con un RMSE similar al reportado por otros autores, mientras que el modelo del CAG, presenta un RMSE de calibración alto en comparación con lo hallado en otros trabajos, así como respecto a los modelos de los suelos de CAM y de CIC.

Tabla 3. Parámetros del modelo de calibración y validación para los suelos en estudio.

Sitio	**Parámetro Estadístico**				
		R^2	**RMSE**	**SD**	**RPD**
Centro Agropecuario Marengo	Calibración	0,97	0,02	0,10	5,16
	Validación	0,95	0,02	0,10	5,00
Centro Agropecuario La Granja	Calibración	0,85	0,04	0,11	2,75
	Validación	0,81	0,05	0,11	2,20
	Calibración	0,97	0,02	0,12	5,83

Centro de Investigación Carimagua	Validación	0,95	0,03	0,12	4,00
Todas las muestras	Calibración	0,87	0,04	0,11	2,75
	Validación	0,90	0,03	0,11	3,67

De acuerdo con los criterios de predicción de RPD, para las propiedades del suelo se puede considerar que un valor de RPD superior a 2,0 da una buena predicción, un valor entre 1,4 y 2,0 indica una predicción razonable y un valor inferior a 1,4 indica una predicción no confiable [25]. Considerando que los valores de RPD de los modelos obtenidos para los tres suelos presentaron valores mayores a 2,0, tanto para la calibración y el proceso de validación, se puede concluir que los modelos de predicción son robustos, como se observa en los resultados presentados en Tabla 3.

Por último, se generó un modelo a partir de todos los suelos en estudio, sin importan su origen y orden. Este nuevo modelo presentó altos coeficientes de regresión, y errores relativamente bajos, similares a los alcanzados por otros autores. De igual forma, presenta un RPD mayor a 2,0 lo que hace que este modelo posea una alta capacidad predictiva. Sin embargo, cabe resaltar que el valor del RPD fue menor que cuando se calibraron modelos por orden de suelos, así como el coeficiente de determinación tanto para la calibración como para la validación. Estos resultados permiten afirmar que, aunque es un buen modelo, la confiabilidad disminuye levemente, por lo cual es conveniente, siempre que se tengan suficientes muestras e información, elaborar modelos de acuerdo al orden del suelo o de una zona en particular [26].

3.4. Análisis de componente principales (ACP)

Se realizó ACP en los cuatro grupos usados para la obtención de los modelos, con el fin de identificar muestras con similar contenido de agua. Los resultados muestran que en los cuatro modelos es diferenciable el contenido de agua. En el Inceptisol, los dos primeros componentes principales representan el 89% de la varianza total (Figura 3A). En el caso del Alfisol, se presentó una mayor diferenciación entre las muestras con un bajo contenido de agua, frente a los otros dos contenidos, que, aunque también se diferencian entre sí, lo hacen en menor medida (Figura 3B). La varianza total de estas muestras se explica en un 90% en los dos primeros componentes principales. Para el Oxisol (Figura (3C), la varianza de los dos primeros componentes principales representa el 96%, siendo el suelo con mejor diferenciación en los tres contenidos de agua.

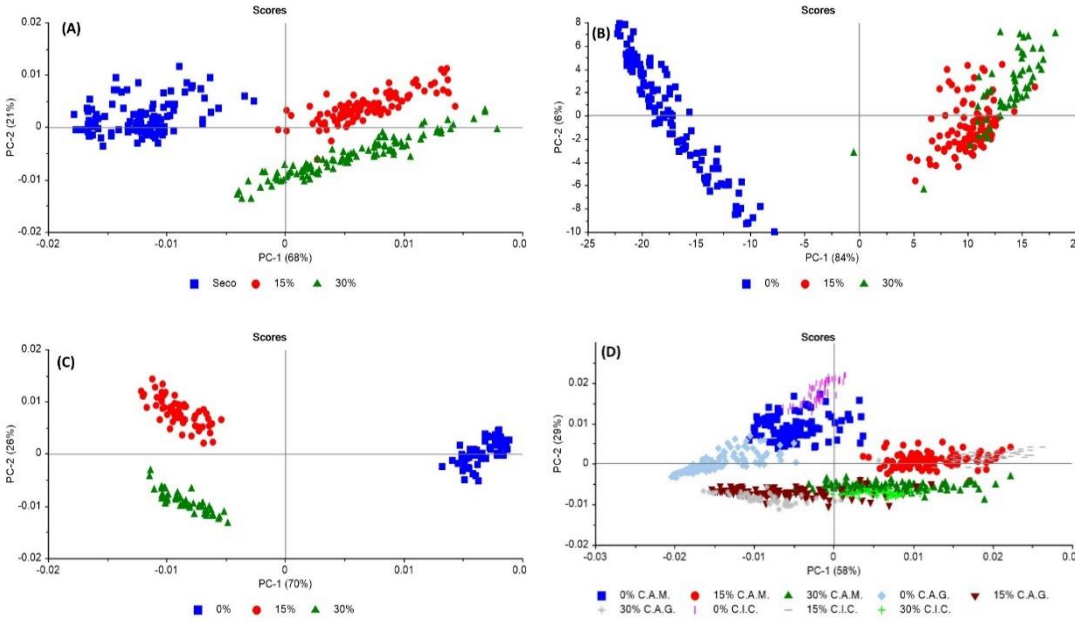


Figura 3. Varianza de los dos primeros componentes principales del ACP a diferentes contenidos de agua del suelo para: (A) Centro Agropecuario Marengo (Inceptisol); (B) Centro Agropecuario la Granja (Alfisol); (C) Centro de Investigación Carimagua (Oxisol); (D) todas las muestras de suelo.

Por último, cuando se considera un solo conjunto de datos incluyendo todas las muestras de suelo, la varianza de los dos primeros componentes principales es del 87%, donde el primer componente principal explica el 58% de esta varianza, mientras que el componente principal 2 explica el 29% (Figura 3D). También se observa que existe una diferenciación significativa de las muestras que tienen un porcentaje de humedad cercana al 0% y una diferencia, no tan marcada, entre los otros dos contenidos de agua.

4. Conclusiones

La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR), permitió estimar el contenido de agua de los suelos investigados. Para todos los modelos se encontró que tienen una alta capacidad predictiva, Inceptisol (R2 = 0,97, RMSE = 0,02), Alfisol (R2 = 0,85, RMSE = 0,04), Oxisol (R2 = 0,97, RMSE = 0,02). Al mismo tiempo, el modelo realizado con los tres suelos tuvo una buena capacidad predictiva (R2 = 0,87, RMSE = 0,04). A partir del análisis de los principales componentes, se observa que puede haber una notable diferenciación entre los contenidos de agua para cada uno de los suelos, y de la misma manera, para el modelo que reúne los tres suelos. Se evidenció que existe una diferenciación entre los contenidos de agua y entre los suelos, sin embargo, menos marcada que para el modelo individual de cada suelo.

5. Agradecimientos: Los autores agradecen por la financiación recibida para el proyecto No. 37685, de la Universidad Nacional de Colombia, a través de la "convocatoria nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, creación e innovación de la universidad nacional de Colombia 2016-2018", del proyecto No. 37685.

References

1. Bryant, R.; Thoma, D.; Moran, S.: Holifield, C.; Goodrich, D.; Keefer, T.; Paige, G.; Willians, D.; Skirvin, S. Evaluation of Hyperspectral, Infrared Temperature and Radar Measurements for Monitoring Surface Soil Moisture. First Interagency Conference in the Watersheds, 2003, 528–533. Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.533.4720&rep=rep1&type=pdf
2. Nawar, S.; Buddenbaum, H.; Hill, J.; Kozak, J.; Mouazen, A. M. Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. Soil and Tillage Research, 2016, 155(510–522). https://doi.org/10.1016/J.STILL.2015.07.021
3. Lobell, D.; Asner, G. Moisture effects on soil reflectance. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3), 722–727. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7220
4. Skoog, D.A.; Holler, F.J.; Crouch, S.R. Principles of Instrumental Analysis. 2007. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=GrOsQgAACAAJ
5. Reich, G. Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications. Advanced Drug Delivery Reviews, 2005, 8(1109-1143), https://doi.org/10.1016/j.addr.2005.01.020
6. Camacho-Tamayo, J.H.; Forero-Cabrera, N.M.; Ramírez-López, L.; Rubiano, Y. Near-infrared spectroscopic assessment of soil texture in an oxisol of the eastern plains of Colombia. Colombia Forestal, 2017, 20(1), 5–18. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a01
7. Bastidas-Obando, E.; Carbonell, J. Caracterización espectral y mineralógica de los suelos del valle del río Cauca por espectroscopía visible e infrarroja (400- 2500 nm). Agronomía Colombiana, 2010, 38(2), 291–301.
8. Liland, K. H.; Mevik, B.-H.; Wehrens, R. PLS: Partial least squares and principal component regression (R package version 2.8-0). 2021. https://cran.r-project.org/package=pls
9. Hunt, G. R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 1977, 42(3), 501–513. https://doi.org/10.1190/1.1440721
10. Palmer, K. F.; Williams, D. Optical properties of water in the near infrared. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64(8), 1107–1110. https://doi.org/10.1364/josa.64.001107
11. Whalley, W.R.; Stafford, J.V. Real-time sensing of soil water content from mobile machinery: Options for sensor design. Computers and Electronics in Agriculture, 1992, 7(4), 269–284. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(05)80010-9
12. Whiting, M.L.; Li, L.; Ustin, S.L. Predicting water content using Gaussian model on soil spectra. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4), 535–552. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2003.11.009
13. Weidong, L.; Baret, F.; Xingfa, G.; Qingxi, T.; Lanfen, Z.; Bing, Z. Relating soil surface moisture to reflectance. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2-3), 238–246. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00347-9.
14. Bonett, J.P.; Camacho-Tamayo, J.H.; Ramírez-López, L. Mid-infrared spectroscopy for the estimation of some soil properties. Agronomía Colombiana, 2015, 33(1), 99-106. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n1.49245
15. Nocita, M.; Stevens, A.; Noon, C.; van Wesemael, B. Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. Geoderma, 2013, 199, 37–42. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.020
16. Stenberg, B.; Viscarra Rossel, R.A. Proximal Soil Sensing. 2010. In R.A. Viscarra Rossel; A. B. McBratney; B. Minasny (Eds.), Proximal Soil Sensing. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8859-8
17. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Tolima. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdireccion de Agrologia.
18. Camacho-Tamayo, J.H.; Rubiano S., Y.; Hurtado S., M.P. Near-infrared (NIR) diffuse reflectance spectroscopy for the prediction of carbon and nitrogen in an Oxisol. Agronomía Colombiana, 2014, 32(1), 86–94. http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n1.38967
19. Fernández-Martínez, F.; Camacho-Tamayo, J.H.; Rubiano-Sanabria, Y. Estimating texture and organic carbon of an Oxisol by near infrared spectroscopy. Revista Ciência e Agronômica, 2022, 53, https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220020

20. Whalley, W.R.; Leeds-Harrison, P.B.; Bowman, G.E. Estimation of soil moisture status using near infrared reflectance. Hydrological Processes, 1991, 5(3), 321–327. https://doi.org/10.1002/hyp.3360050312
21. Ogen, Y.; Faigenbaum-Golovin, S.; Granot, A.; Shkolnisky, Y.; Goldshleger, N.; Ben-Dor, E. Removing Moisture Effect on Soil Reflectance Properties: A Case Study of Clay Content Prediction. Pedosphere, 2019, 29(4), 421–431. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60811-8
22. Ge, Y.; Morgan, C.L.S.; Ackerson, J.P. VisNIR spectra of dried ground soils predict properties of soils scanned moist and intact. Geoderma, 2014, 221–222, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.011
23. Mouazen, A.M.; Karoui, R.; De Baerdemaeker, J.; Ramon, H. Characterization of Soil Water Content Using Measured Visible and Near Infrared Spectra. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(4), https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0297
24. Somers, B.; Gysels, V.; Verstraeten, W.W.; Delalieux, S.; Coppin, P. Modelling moisture-induced soil reflectance changes in cultivated sandy soils: a case study in citrus orchards. European Journal of Soil Science, 2010, 61(6), 1091–1105. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01305.x
25. Chang, C.W.; Laird, D.A.; Mausbach, M.J.; Hurburgh, C.R. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2), https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x
26. Bonett, J.P.; Camacho-Tamayo, J.H.; Vélez-Sánchez, J.E. Estimating soil properties with mid-infrared spectroscopy. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 2016, 25, 19(1), 55-66. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000100007&lng=en.

Eficiencia del contralavado en la eliminación de sólidos retenidos en filtros de arena en instalaciones de riego por goteo

Miquel Duran-Ros [1], Joan Pujol [1], Toni Pujol [2], Sílvia Cufí [1], Jonathan Graciano-Uribe [2], Gerard Arbat [1], Francisco Ramírez de Cartagena [1] y Jaume Puig-Bargués [1,*]

[1] Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Girona; miquel.duranros@udg.edu, joan.pujol@udg.edu, silvia.cufi@udg.edu, gerard.arbat@udg.edu, francisco.ramirez@udg.edu, jaume.puig@udg.edu

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Girona; toni.pujol@udg.edu, jonathan.graciano@udg.edu

* Correspondencia: jaume.puig@udg.edu; Tel.: +34 972 41 84 59

Abstract: Sand media filters are recommended to prevent emitter clogging with loaded irrigation waters, but their performances rely on backwashing. However, there is a lack of information about the solid removal efficiency achieved by backwashing along the media bed depth. An experimental filter with a 200 mm silica sand bed height was used to assess the effect of two operation velocities (30/45 and 60/75 (filtration/backwashing) m h^{-1}) and two clogging particles (inorganic sand dust and organic from a reclaimed effluent) on the efficiency of backwashing for removing the total suspended solids retained in different media bed slices. The average solid removal backwashing efficiency was greater with organic particles (78%) than with inorganic ones (64%), reaching its maximum at a 5–15 mm bed depth. The higher operation velocities increased the solid removal efficiency by 16%, using organic particles, but no significant differences were observed with inorganic particles. The removal efficiencies across the media bed were more uniform with organic particles (63–89%) than with inorganic (40–85%), which makes it not advisable to reduce the media height when reclaimed effluents are used.

Palabras clave: tecnología de riego; filtro granular; filtración; fluidización; agua depurada, reutilización de agua, sólidos en suspensión

1. Introducción

Un elemento clave en cualquier instalación de riego por goteo es el sistema de filtración, ya que evita la obturación de los goteros al retener las partículas en suspensión presentes en el agua de riego [1]. Los filtros de arena se utilizan habitualmente cuando el agua de riego presenta una carga elevada de partículas orgánicas [2]. En este tipo de filtros, se forma un lecho de filtración con materiales granulares en el que las partículas transportadas por el agua de riego quedan atrapadas debido a la acción de diversos mecanismos como la retención en superficie, la intercepción, la inercia, la sedimentación, la difusión y la acción hidrodinámica, los cuales actúan simultáneamente [3]. Conforme se van reteniendo

partículas en el lecho filtrante, la caída de presión a lo largo del filtro aumenta y el caudal filtrado se reduce [4]. Para restablecer las condiciones de filtración adecuadas, el filtro se lava a contracorriente invirtiendo el flujo para fluidizar el lecho filtrante y liberar las partículas retenidas [5], siendo el contralavado una operación crítica para conseguir una operación y un rendimiento óptimo de los filtros de arena [4].

Diferentes estudios [6-8] han analizado la cantidad de sólidos retenidos a lo largo de lechos filtrantes de arena, pero es necesario disponer de más información sobre los sólidos que se consiguen eliminar con el contralavado para completar un modelo matemático [9] que, por ahora, sólo permite calcular la retención de partículas y su distribución espacial al final del ciclo de filtrado. Por este motivo, el objetivo principal del presente estudio fue evaluar la eficiencia del contralavado en la eliminación de sólidos suspendidos del lecho filtrante con dos velocidades de filtración y contralavado utilizando dos tipos de partículas obturadoras.

2. Materiales y Métodos

2.1. Dispositivo experimental

2.1.1. Filtro de arena experimental

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando un filtro cilíndrico construido en polimetilmetacrilato, con una altura de 340 mm y un diámetro interno de 110 mm. El diámetro del filtro experimental se redujo por un factor de 4,54 a partir de un filtro comercial de arena de 500 mm de diámetro interno para permitir la realización de los experimentos con velocidades de filtración del agua comunes en la práctica real. Un difusor cilíndrico fijado a la parte superior del filtro distribuyó homogéneamente el flujo de agua sobre la superficie del medio filtrante. El drenaje inferior del filtro consistió en una placa perforada de acero inoxidable colocada en la parte inferior del filtro. Este drenaje inferior podía elevarse con un sistema de tornillo para obtener rebanadas del lecho filtrante del espesor deseado para su posterior análisis. Se pueden obtener más detalles sobre el filtro experimental en Duran-Ros et al. [8].

2.1.2. Dispositivo experimental en el laboratorio

Además del filtro de arena experimental, el montaje experimental de laboratorio (Figura 1) contaba con un depósito de agua troncocónico de 0,06 m3, un termómetro digital con una precisión de ±1 °C, una bomba centrífuga Niza 60/3 (Hidráulica Alsina, La Llagosta, España), un caudalímetro CZ3000 DN15 (Contazara, Zaragoza, España) con una precisión de ±1%, y los accesorios necesarios. Las presiones a la entrada y salida del filtro se midieron utilizando un manómetro Leo

2 (Keller, Winterthur, Suiza) con una precisión de ±0,07%. Cambiando adecuadamente los accesorios, los experimentos podían realizarse en modo de filtración, que operaba como un circuito cerrado, o en modo de contralavado (Figura 1). Las velocidades de filtración y contralavado se alcanzaron modificando la apertura de una válvula de compuerta general colocada después del tanque de agua.

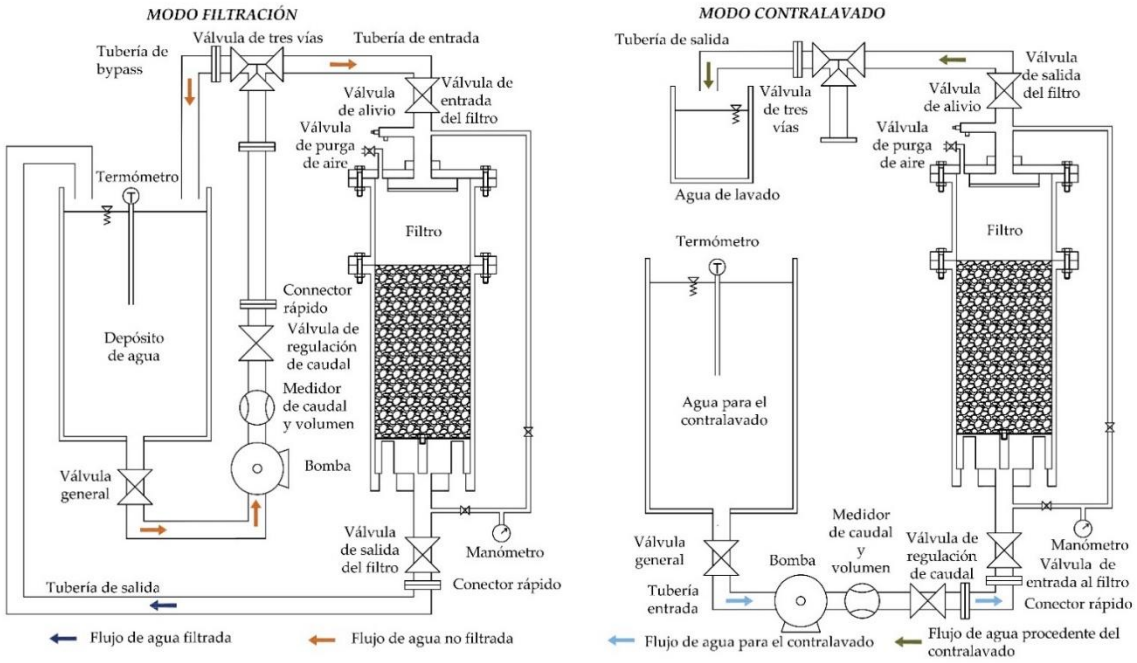


Figura 1. Dispositivo experimental para la realización de los ensayos de filtración y contralavado en condiciones de laboratorio.

2.1.3. Dispositivo experimental en la estación depuradora de aguas residuales

El dispositivo experimental descrito en el apartado anterior se trasladó a la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Celrà (Girona, España) para realizar los experimentos utilizando el efluente de un proceso de fangos activos, que se bombeó desde el depósito de salida de los tanques de decantación de esta EDAR. Una vez filtrado, el efluente se vertía al depósito de salida de la EDAR, sin que se produjera recirculación del mismo. El agua de contralavado también se vertía al mismo depósito de salida.

2.2. Procedimiento experimental

2.2.1. Experimentos de filtración y contralavado

En el presente estudio se evaluó el efecto del contralavado sobre la cantidad de sólidos en suspensión totales retenidos a lo largo del lecho filtrante de dos tipos de agua con diferentes tipos de partículas obstructivas y dos velocidades de filtración y contralavado.

Antes de comenzar cada experimento de filtración o contralavado realizado en el laboratorio o en la EDAR, se hizo circular agua de red por el dispositivo experimental hasta que la turbidez del agua de salida (determinada con un turbidímetro HI-93703 (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EE.UU.)) era inferior a 1,5 FNU para garantizar así la limpieza del equipo experimental, de acuerdo con la norma EN 16713-1 [10]. A continuación, el filtro se rellenó con 2,67 kg de arena de sílice CA-07MS (Sibelco Hispania, Bilbao, España) para alcanzar una altura de lecho de 200 mm. La arena de sílice utilizada en el experimento tenía un D10 (tamaño de la abertura del tamiz que permite pasar el 10% de la masa de la muestra de arena) de 0,48 mm, un D60 (tamaño de la abertura del tamiz que deja pasar el 60% de la masa de la arena) de 0,83 mm, un coeficiente de uniformidad (D60/D10) de 1,73 y una porosidad (relación entre el volumen de poro y el volumen total ocupado por el medio) de 0,40.

Siguiendo las indicaciones de la norma EN 16713-1 [10], se contralavó el medio filtrante con agua de subministro urbano hasta que la turbidez del agua de salida era inferior a 1,5 FNU. A continuación, se llevaron a cabo los experimentos de filtración, ajustando la válvula de compuerta de entrada hasta que la velocidad de filtración estaba próxima al valor deseado (es decir, 30 o 60 m h−1). Además, la válvula de compuerta de salida también se ajustó para alcanzar 120 kPa, que era la presión de trabajo de filtración.

En los experimentos de laboratorio, se añadieron 0,28 g de polvo de ensayo Arizona clase A4 (Powder Technology Inc., Arden Hills, MN, EE. UU.), con D10 = 5,1 µm y D60 = 43,9 µm, al depósito troncocónico cada 5 o 2,5 min, para las velocidades de filtración de 30 y 60 m h−1, respectivamente, para mantener la carga de sólidos a la entrada del filtro en 0,5 g L−1, siguiendo la norma EN 16713-1 [10]. El volumen, el caudal, las presiones de entrada y salida y la temperatura se registraron cada 2,5 min. Cuando la caída de presión total a través del filtro superaba la pérdida de presión inicial del filtro en 50 kPa, se consideraba que el lecho del medio estaba obturado, se daba por finalizado el ciclo de filtrado y se determinaban los sólidos retenidos a lo largo del lecho del medio filtrante.

En una serie de experimentos, se modificó la configuración experimental (Figura 1) para invertir el flujo y poder contralavar los lechos obturados durante 3 min. La abertura de las válvulas de compuerta de la entrada se fue modificando hasta alcanzar la velocidad de contralavado deseada, 45 y 75 m h−1 para velocidades de filtración de 30 y 60 m h−1, respectivamente, ya que las dimensiones del filtro experimental no permitían velocidades de lavado a contracorriente más elevadas. El mismo procedimiento de filtración y retrolavado se utilizó en los experimentos realizados en la EDAR, pero, en este caso, el filtro experimental operó con agua

residual depurada en el modo de filtración y con agua potable en el modo de contralavado.

Todos los experimentos, tanto en el laboratorio como en la EDAR, se realizaron por cuatriplicado cada velocidad y modo de operación (filtración y contralavado). Sin embargo, los resultados de una réplica de los experimentos de contralavado con polvo de arena para cada velocidad y uno a 30 m h−1 con el agua depurada se descartaron debido a algunas inconsistencias observadas al procesar los datos.

2.2.2. Determinación de los sólidos en suspensión retenidos a lo largo del lecho filtrante

Una vez finalizada cada prueba de filtración y contralavado, se obtuvieron trece rebanadas del medio filtrante elevando el drenaje inferior con el dispositivo helicoidal existente en la base del filtro experimental. El espesor de estas porciones fue de 5 mm en los 20 mm superiores del lecho y de 20 mm desde los 20 hasta los 200 mm de profundidad del lecho. Las distintas porciones se extraían cuidadosamente del lecho y se colocaban en un recipiente plástico para proceder a su posterior análisis.

Para determinar los sólidos en suspensión totales presentes en las rebanadas de arena se siguió el procedimiento de van Staden y Haarhoff [11]. En las cuatro primeras rodajas de arena, de 5 mm de espesor, se añadieron 100 mL de agua destilada a cada una de las probetas a las que se transfirieron las lonchas obtenidas. En las rebanadas de 20 mm de grosor se tomó una muestra de arena de 50 mL, se colocó en una probeta y se añadieron 100 mL de agua destilada. A continuación, la probeta se agitó e invirtió enérgicamente 20 veces antes de decantar el sobrenadante. Este procedimiento se llevó a cabo 5 veces por muestra, excepto en la rodaja superior, en la que la obtención de un sobrenadante claro requirió repetir este proceso 10 veces. Con este procedimiento se obtuvo una solución de 500 mL (1000 mL para la primera loncha) con los sólidos retenidos por la arena del filtro. Se utilizó una muestra de la suspensión obtenida para determinar los sólidos en suspensión totales (SST) siguiendo los métodos estándar para el examen de aguas y aguas residuales [12] y poder así, determinar la masa de sólidos retenidos por masa de medio filtrante.

La eficiencia en la eliminación de los sólidos en suspensión totales en cada loncha de medio filtrante conseguida por el contralavado se calculó con la siguiente ecuación:

$$E_{SST\ loncha_i} = \frac{\left(\frac{SST_i}{m\ loncha_i}\right)_F - \left(\frac{SST_i}{m\ loncha_i}\right)_{CL}}{\left(\frac{SST_i}{m\ loncha_i}\right)_F} \cdot 100 \quad (1)$$

siendo $E_{SST\ loncha_i}$ la eficiencia en la eliminación de los sólidos suspendidos totales retenidos en la rodaja del medio filtrante i (%), y $\left(\frac{SST_i}{m\ loncha_i}\right)_F$ y $\left(\frac{SST_i}{m\ loncha_i}\right)_{CL}$ el cociente de los sólidos en suspensión totales en la locha i respecto la masa de esta loncha después de la filtración (F) y del contralavado (CL) (g SST g medio filtrante−1), respectivamente.

2.3. Tratamiento estadístico

La eficiencia del contralavado en la eliminación de los sólidos suspendidos totales a lo largo del lecho filtrante se evaluó con un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa estadístico SPSS (IBM, Armonk, NY, EE. UU.). El modelo estadístico incluyó como efectos fijos la velocidad de operación objetivo, el tipo de partícula y la profundidad del medio filtrante, así como sus interacciones dobles y triples. Se utilizó la prueba de comparación por pares de Tukey para evaluar si las medias de mínimos cuadrados eran significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

3. Resultados

Los resultados del análisis de varianza del modelo para la eficiencia de eliminación de sólidos en suspensión totales lograda por el contralavado se muestran en la Tabla 1. El modelo, todos los factores independientes (velocidad de operación, tipo de partícula y profundidad del lecho) y dos interacciones dobles (velocidad de operación × tipo de partícula y tipo de partícula × profundidad del medio filtrante) fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$). Únicamente la interacción doble entre la velocidad de operación y la profundidad del lecho y la interacción triple no fueron significativas ($p > 0,05$). En este apartado, se van a analizar las interacciones dobles estadísticamente significativas.

Tabla 1. Niveles de significación (*p-valor*) del modelo estadístico, de cada factor independiente (velocidad de operación, tipo de partícula añadida y profundidad del lecho filtrante) y de sus interacciones dobles y triples para explicar la eficiencia en la eliminación de sólidos alcanzada por el contralavado.

Factor	*p-valor*
Modelo	<0,001
Velocidad de operación	<0,001
Tipo de partícula añadida	<0,001
Profundidad del lecho filtrante	<0,001
Velocidad de operación × tipo de partícula	<0,001

Velocidad de operación × profundidad del lecho filtrante	>0,050
Tipo de partícula × profundidad del lecho filtrante	<0,001
Velocidad de operación × tipo de partícula × profundidad lecho	>0,050

3.1. Efecto de la velocidad de operación y del tipo de partícula

La interacción entre la velocidad de operación y el tipo de partícula filtrada se muestra en la Figura 2. La eficiencia total de eliminación de sólidos suspendidos en todo el lecho del medio filtrante fue de alrededor del 64% cuando se agregó polvo de arena Arizona tipo A4, sin observarse diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre ambas velocidades. Sin embargo, con el agua depurada, la eficiencia de eliminación de sólidos fue significativamente mayor ($p < 0,05$) a una velocidad de operación de 60/75 m h−1 (filtración/contralavado) (86%) que operando a 30/45 m h−1 (70%). Las eficiencias de eliminación de sólidos tendieron a mejorar cuando se utilizó el agua residual depurada, pero únicamente fueron significativamente más elevadas ($p < 0,05$) a velocidades de operación de 60/75 m h−1.

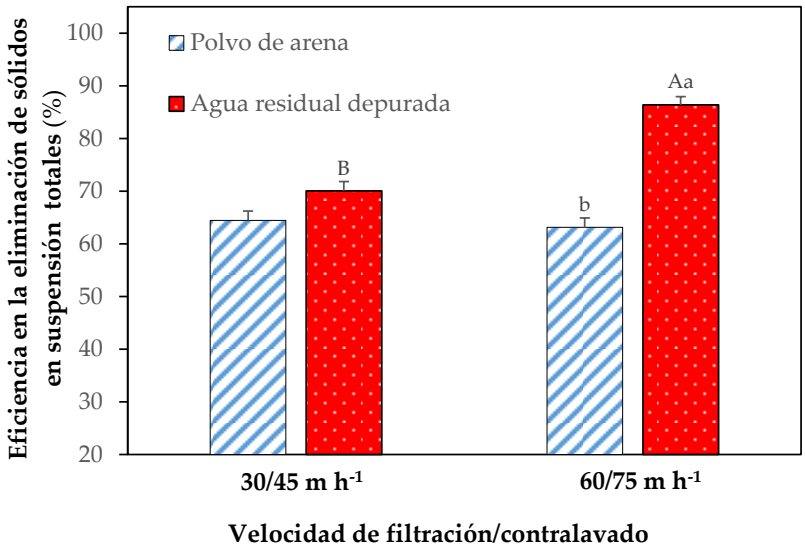


Figura 2. Medias de mínimos cuadrados (± errores estándar) de la eficiencia de eliminación de sólidos en suspensión totales lograda por el contralavado respecto el tipo de partículas agregadas y la velocidad de operación. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tipo de partículas para una misma velocidad. Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las velocidades de operación para un mismo tipo de partícula.

3.2. Efecto del tipo de partícula y de la profundidad del lecho filtrante

La Figura 3 muestra el efecto del tipo de partícula y la profundidad del lecho filtrante en la eliminación de sólidos en suspensión lograda por el contralavado. En general, las mayores eficiencias se observaron a profundidades entre 5 y 20 mm. Cuando se utilizó el agua depurada, las eficiencias de eliminación de 5 a 20 mm de profundidad (87% en promedio) fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) que en la loncha

más profunda, de 180 a 200 mm (63%). No se observaron otras diferencias significativas entre el resto de rebanadas del lecho, aunque la segunda eficiencia de eliminación más baja estuvo en los primeros 5 mm (68%).

Con polvo de arena, las eficiencias fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) entre 5 y 15 mm (84% de media) que de 60 a 200 mm (52% en promedio). La eficiencia más baja (40%) se observó entre los 160 y 180 mm, pero no fue estadísticamente diferente de la observada entre 180 y 200 mm (47%).

Solo se observaron diferencias significativas entre el tipo de partículas a profundidades de 120-140 y 160-180 mm, siendo las eficiencias de eliminación de sólidos estadísticamente más elevadas ($p < 0,05$) con el agua depurada que con polvo de arena.

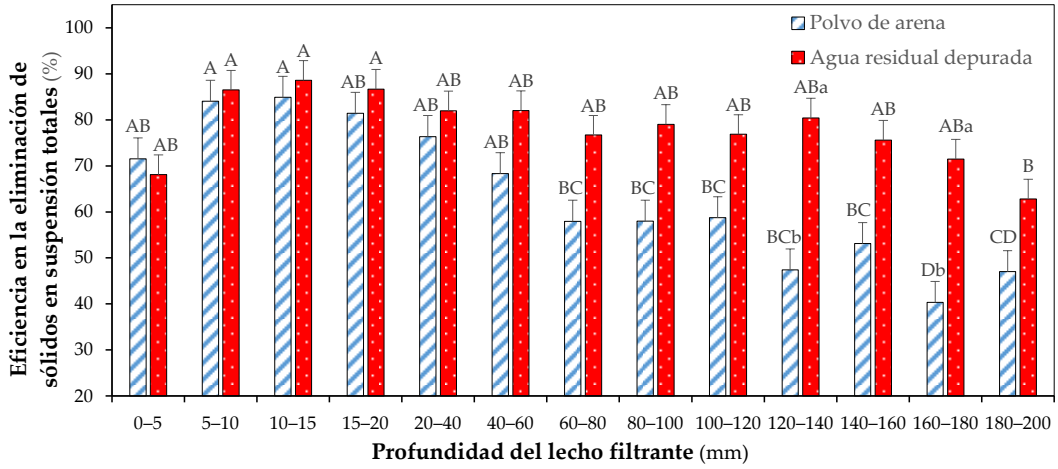


Figura 3. Medias de mínimos cuadrados (± errores estándar) de la eficiencia de eliminación de sólidos en suspensión totales lograda por el contralavado respecto el tipo de partículas añadidas y la profundidad del lecho filtrante. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tipo de partículas para una misma profundidad de lecho. Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) entre profundidades para un mismo tipo de partícula.

4. Discusión

En el presente trabajo se ha utilizado un filtro de arena presurizado construido a escala de laboratorio para analizar el efecto de la velocidad de operación (velocidad de filtración de 30 y 60 m h−1 y velocidad de contralavado aumentada en 15 m h−1), y del tipo de partículas (inorgánicas u orgánicas) agregadas al agua de riego en la eficiencia del retrolavado para eliminar los sólidos en suspensión totales retenidos a lo largo del lecho filtrante. Debido a las limitaciones del filtro experimental, que debía trasladarse del laboratorio a una estación depuradora de aguas residuales, la altura del lecho se restringió a 200 mm. Esta altura es la mínima en filtros comerciales [13] y se encuentra dentro del rango de 80 a 600 mm utilizado en otros

experimentos de laboratorio [14,15]. Por otro lado, las velocidades de filtración en filtros de arena suelen estar entre 20 y 75 m h−1 [7,13,14], efectuándose el contralavado a velocidades más elevadas para poder fluidizar y expandir eficazmente el medio filtrante [4]. Las velocidades de contralavado utilizadas en el presente experimento (45 y 75 m h−1) permitieron una adecuada fluidización del lecho, puesto que ésta se observó visualmente en menos de 10 s.

Diversos autores han abordado el estudio de los sólidos retenidos en el lecho de arena filtrante mediante el análisis de rebanadas de un espesor de 20 mm [16], 87,5 mm [6,7] y 100 mm [14,15]. En el presente trabajo, se han obtenido rebanadas de distinto grosor, siendo más delgadas (5 mm) en los primeros 20 mm y más gruesas (20 mm) en el resto del lecho. Los menores espesores de las rebanadas superficiales se establecieron para poder obtener más información sobre la eficiencia del contralavado en esta zona ya que es donde se retienen más sólidos [13,14] debido al efecto predominante de los mecanismos de filtración superficial [3]. La cantidad total de sólidos suspendidos presentes en cada porción se determinó siguiendo la metodología de van Staden y Haarhoff [11]. A pesar de que este método podría no ser capaz de detectar todas las partículas retenidas en el lecho filtrante [8], utilizamos más masa de medio y capas de lecho más delgadas que en otros estudios [6,7]. Cada rebanada tuvo que ser extraída del lecho para determinar su contenido de sólidos en suspensión, lo que implicó que los resultados después de la filtración y después del contralavado se obtuvieron en experimentos independientes. Otro posible enfoque hubiera sido tomar muestras del medio filtrante [6] para determinar los sólidos en suspensión, pero se priorizó la obtención de información sobre la porción de lecho completa.

La eficiencia de eliminación de sólidos retenidos lograda por el retrolavado se puede explicar por las interacciones dobles entre el tipo de partícula agregada y la velocidad de operación y la profundidad del lecho, respectivamente (Tabla 1). Las eficiencias medias de eliminación de sólidos en todo el lecho filtrante fueron del 64% y 63% cuando se agregó polvo de arena, trabajando a velocidades de filtración/retrolavado de 30/45 y 60/75 m h−1, respectivamente, y del 70% y 86% cuando se utilizó el agua residual depurada a velocidades de 30/45 y 60/75 m h−1, respectivamente (Figura 2). A diferencia de otros estudios [6,7,14], donde los filtros funcionaban durante un tiempo preestablecido, en nuestro trabajo la filtración se realizaba hasta que la pérdida de carga total en el filtro aumentaba 50 kPa respecto a su valor inicial. Esto conllevó que la duración de los ciclos de filtración no fuera la misma en cada prueba. De hecho, operando a 60 m h−1, los ciclos de filtración fueron más cortos, los volúmenes de agua filtrada fueron menores y, por lo tanto, se agregó menos de la mitad de polvo de arena (3,95 y 4,66 g en experimentos de

filtración y contralavado, respectivamente) que a 30 m h−1 (8,39 y 11,11 g). En consecuencia, estas diferencias en la cantidad de polvo de arena añadido durante el modo de filtración permitieron retener menos sólidos suspendidos inorgánicos cuando se trabajó a velocidades de filtración más altas.

Cuando se utilizó el agua residual depurada, la eficiencia total de eliminación de sólidos suspendidos fue significativamente mayor a 60/75 m h−1 (86%) que a 30/45 m h−1 (70%). La carga de partículas durante los experimentos realizados en la EDAR no se pudo fijar con tanta precisión como en las pruebas de laboratorio debido a la propia variabilidad del efluente, pero los ciclos de filtración y el volumen filtrado fueron mayores a velocidades de 60/75 m h−1 que a 30/45 m h−1 y, en consecuencia, la cantidad de sólidos añadidos fue más grande con la mayor velocidad de operación (20,28 y 10,92 g frente a 7,84 y 8,61 g para los experimentos de filtración y retrolavado, respectivamente). La mayor cantidad de sólidos añadidos a velocidades de operación más altas puede haber contribuido a aumentar el arrastre y el esfuerzo cortante del flujo, que son mecanismos involucrados en el desprendimiento de partículas durante el retrolavado [17].

En general, se observaron mayores eficiencias de eliminación de sólidos con el agua residual depurada (78% de media) que con polvo de arena (64%), pero solo fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) a velocidades de filtración/retrolavado de 60/75 m h−1. Las mayores eficiencias de remoción con el efluente podrían atribuirse al hecho de que las partículas orgánicas se fluidizarían mejor y, por lo tanto, se podrían liberar más fácilmente durante el retrolavado del lecho, pero esta hipótesis debería confirmarse en otro experimento.

Las eficiencias de eliminación de los sólidos fueron significativamente ($p < 0,05$) más elevadas entre los 5 y 15 mm de profundidad del lecho (84 % en promedio) que de 60 a 160 mm y de 180 a 200 mm (54 %) (Figura 3). A pesar de tener la máxima cantidad de sólidos retenidos, las eficiencias de eliminación logradas con el contralavado (71 y 68% con polvo de arena y agua residual depurada, respectivamente) en los primeros 5 mm del lecho no fueron las mejores, aunque no se diferenciaron estadísticamente ($p > 0,05$) de las eficiencias más altas observadas para cada tipo de partícula. La eficiencia mínima de eliminación de sólidos con polvo de arena se observó a una profundidad de 160-180 mm (40%), siendo significativamente inferior ($p < 0,05$) a las logradas en los tramos superiores. Cuando se utilizó el efluente, las eficiencias entre lonchas fueron más similares, siendo significativamente superiores ($p < 0,05$) únicamente en el tramo de 5 a 20 mm (87%) que en el tramo más profundo de 180 a 200 mm (62%). La distribución irregular del flujo que generalmente se observa cerca del drenaje inferior del filtro reduce el área efectiva para fluidizar el lecho [18] y, por lo tanto, es lógico que las eficiencias de

eliminación de sólidos sean inferiores en esta zona. Por el contrario, en la parte superior del lecho filtrante, el flujo de contralavado se desarrolla completamente a través de toda la superficie del medio y, en consecuencia, las eficiencias mejoran. Las eficiencias de eliminación de sólidos observadas en el presente trabajo estuvieron por encima de las halladas en otros estudios, donde para un lecho filtrante de arena con D10 = 0,55 mm variaron del 60% en los 87,5 mm superiores al 20% en los 87,5 mm inferiores a velocidades de filtración de 40 y 60 m h−1 [6,7]. Por otro lado, las diferencias de eliminación de sólidos teniendo en cuenta el tipo de partícula agregada fueron únicamente significativamente mayores ($p < 0,05$), con el agua residual depurada en las rebanadas de profundidades de 120-140 mm y 160-180 mm, siendo esta última la capa donde la eficiencia de eliminación de sólidos alcanzó su mínimo cuando se agregó polvo de arena.

En comparación con el polvo de arena, las eficiencias de eliminación con el agua depurada fueron más uniformes en todo el lecho filtrante, probablemente debido a la mayor presencia de sólidos orgánicos en suspensión a mayores profundidades [8], que podrían eliminarse de manera efectiva cuando el lecho se fluidizaba. Dado que el propósito principal de los filtros de arena es eliminar aquellos sólidos que pueden obstruir los goteros, no se deberían reducir las alturas del lecho cuando se utilizan aguas residuales depuradas. Se han sugerido reducciones de la altura del medio filtrante para reducir el consumo energético y el impacto ambiental de los filtros [19], pero solo se deberían realizar cuando las partículas transportadas por el agua de riego son principalmente inorgánicas.

También se debe señalar que los resultados se obtuvieron en un filtro experimental a escala de laboratorio y podrían verse afectados por sus condiciones hidrodinámicas específicas. Por lo tanto, se necesita ampliar la investigación utilizando filtros comerciales que permitan evaluar el efecto de la retención y eliminación de sólidos, considerando diferentes alturas del lecho, tamaños de grano de las partículas del medio filtrante, materiales alternativos, diseños de filtros, velocidades de filtración y contralavado, así como su operación a largo plazo.

5. Conclusiones

Las eficiencias promedio de eliminación de sólidos en suspensión totales conseguidas por el contralavado fueron más elevadas (73%) utilizando el agua residual depurada que cuando se agregó polvo de arena al agua (64%). Las eficiencias más elevadas se lograron a velocidades de filtración/contralavado de 60/75 m h−1 con el agua depurada.

Las mayores eficiencias de eliminación se observaron a profundidades de 5 a 15 mm y de 5 a 20 mm cuando se utilizó polvo de arena y agua depurada, respectivamente. La eficiencia de eliminación de sólidos fue más constante en toda la altura del lecho filtrante cuando se utilizó agua depurada, pero disminuyó más en las capas de filtro más profundas cuando se agregó polvo de arena. Estos resultados sugieren que la profundidad del lecho filtrante de arena silícea no debe reducirse cuando se filtran efluentes, ya que todas las capas del medio filtrante retienen los sólidos de manera efectiva.

Contribuciones de los Autores: Conceptualización, M.D.-R., T.P., G.A., J.P., F.R.d.C. y J.P.-B.; metodología, M.D.-R., G.A., T.P. y J.P.-B.; análisis formal, M.D.-R. y J.P.-B.; investigación, M.D.-R., T.P., J.P., G.A., S.C., J.G.-U., F.R.d.C y J.P.-B.; recursos, M.D.-R., T.P. y J.P-B.; curación de los datos, M.D.-R. y J.P-B.; redacción—preparación del borrador original, J.P.-B. y M.D.-R.; redacción—revisión y edición, J.P.-B., M.D.-R., T.P., J.P., G.A., S.C., J.G.-U. y F.R.d.C.; supervisión, J.P-B. y F.R.d.C.; administración del proyecto, J.P-B.; adquisición de financiación, J.P-B. Todos los autores han leído y han aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación fue financiada por la Universitat de Girona (Proyecto PONT2022/03) y por la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (PID2023-147561OB-I00).

Declaración del Comité de Ética: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de Disponibilidad de Datos: Los datos presentados en este estudio se pueden solicitar al autor de correspondencia.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer al Ayuntamiento de Celrà su ayuda para realizar este experimento.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

1. Rogers, D.H.; Lamm, F.R.; Aguilar, J. *Subsurface Drip Irrigation (SDI) Components: Minimum Requirements*; Kansas State University: Manhattan, KS, EE.UU, 2018.
2. Zhou, H.; Li, Y.; Wang, Y.; Zhou, B.; Bhattarai, R. Composite Fouling of Drip Emitters Applying Surface Water with High Sand Concentration: Dynamic Variation and Formation mechanism. *Agric. Water Manag*. **2019**, *215*, 25–43. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.009.
3. Cescon, A.; Jiang, J.-Q. Filtration Process and Alternative Filter Media Material in Water Treatment. *Water* **2020**, *12*, 3377. https://doi.org/10.3390/w12123377.
4. Nakayama, F.S.; Boman, B.J.; Pitts, D.J. Maintenance. In *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation and Management*; Lamm, F.R., Ayars, J.E., Nakayama, F.S., Eds.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2007; pp. 389–430.
5. Burt, C.M. Hydraulics of Commercial Sand Media Filter Tanks Used for Agricultural Drip Irrigation. In *ITRC Report No. R 10001. Irrigation Training and Research Center*; California Polytechnic State University: San Luis Obispo, CA, EE.UU., 2010.
6. de Deus, F.P.; Testezlaf, R.; Mesquita, M. Assessment Methodology of Backwashing in Pressurised Sand Filters. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* **2016**, *20*, 600–605. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p600-605.
7. Mesquita, M.; de Deus, F.P.; Testezlaf, R.; Diotto, A.V. Removal Efficiency of Pressurized Sand Filters During the Filtration Process. *Desalin. Water Treat*. **2019**, *161*, 132–143. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24285.

8. Duran-Ros, M.; Pujol, J.; Pujol, T.; Cufí, S.; Arbat, G.; Ramírez de Cartagena, F.; Puig-Bargués, J. Solid Removal across the Bed Depth in Media Filters for Drip Irrigation Systems. *Agriculture* **2023**, *13*, 458. https://doi.org/10.3390/agriculture13020458.
9. Pujol, T.; Duran-Ros, M.; Arbat, G.; Cufí, S.; Pujol, J.; Ramírez de Cartagena, F.; Puig-Bargués, J. Pressurised Sand Bed Filtration Model: Set up and Energy Requirements for a Filtration Cycle. *Biosyst. Eng*. **2024**, *238*, 62–77. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.01.001.
10. *EN 16713-1:2016*; Domestic Swimming Pools—Water Systems—Part 1: Filtration Systems—Requirements and Test Methods. CEN: Bruselas, Bélgica, 2016.
11. van Staden, S.J.; Haarhoff, J. The Use of Filter Media to Determine Filter Cleanliness. *Phy. Chem.Earth* **2011**, *36*, 1135–1140. https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.067.
12. Baird R.B., Eaton A.D., Rice, E.W (ed.). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed.; American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation: Washington, DC, USA, 2017.
13. Solé-Torres, C.; Puig-Bargués, J.; Duran-Ros, M.; Arbat, G.; Pujol, J.; Ramírez de Cartagena, F. Effect of Underdrain Design, Media Height and Filtration Velocity on the Performance of Microirrigation Sand Filters Using Reclaimed Effluents. *Biosyst. Eng*. **2019**, *187*, 292–304. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.09.012.
14. Song, L.; Cai, J.; Zhai, G.; Feng, J.; Fan, Y.; Han, J.; Hao, P.; Ma, N.; Miao, F. Comparative Study and Evaluation of Sediment Deposition and Migration Characteristics of New Sustainable Filter Media in Micro-Irrigation Sand Filters. *Sustainability* **2024**, *16*, 3256. https://doi.org/10.3390/su16083256.
15. Zhang, W.; Cai, J.; Zhai, G.; Song, L.; Lv, M. Experimental Study on the Filtration Characteristics and Sediment Distribution Influencing Factors of Sand Media Filters. *Water* **2023**, *15*, 4303. https://doi.org/10.3390/w15244303.
16. Duran-Ros, M.; Solé-Torres, C.; Ait-Mouheb, N.; Molle, B.; Arbat, G.; Puig-Bargués, J. Media Filter Fouling Assessment Using Optical Coherence Tomography: New Methodology. *Biosyst. Eng*. **2021**, *204*, 26–35. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.008.
17. Fitzpatrick, C.S.B. Filter Backwashing Mechanisms. Ph.D. Dissertation, University College London, Londres, Reino Unido, 1991.
18. Mesquita, M.; Testezlaf, R.; de Deus, F.P.; da Rosa, L.M. Characterization of Flow Lines Generated by Pressurized Sand Filter Underdrains. *Chem. Eng. Trans*. **2017**, *58*, 715–720. https://doi.org/10.3303/CET1758120.
19. Pujol, J.; Espinach, F.X.; Duran-Ros, M.; Arbat, G.; Pujol, T.; Ramírez de Cartagena, F.; Puig-Bargués, J. Environmental Assessment of Underdrain Designs for Granular Media Filters in Drip Irrigation Systems. *Agriculture* **2022**, *12*, 810. https://doi.org/10.3390/agriculture12060810.

Efecto del tipo de medio filtrante y del drenaje en el régimen de contralavado de filtros de arena presurizados

Jonathan Graciano-Uribe [1], Toni Pujol [1], Miquel Duran-Ros [2], Gerard Arbat [2], Francisco Ramírez de Cartagena [2] y Jaume Puig-Bargués [2,*]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Girona; jonathan.graciano@udg.edu, toni.pujol@udg.edu

[2] Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Girona; miquel.duranros@udg.edu, gerard.arbat@udg.edu, francisco.ramirez@udg.edu, jaume.puig@udg.edu

* Correspondencia: jaume.puig@udg.edu; Tel.: +34 972 41 84 59

Abstract: Sand media filters used in drip irrigation need periodic backwashing to flush those retained particles out of the porous media. The selection of more efficient backwashing operational conditions requires accurate information of the pressure drop and the bed expansion, the latter being not commonly available. An experimental study using a laboratory scaled filter with a window to observe the bed expansion was conducted with three porous media types (glass microspheres and two silica sands of different grain size), two packed media bed heights (200 mm and 300 mm) and four nozzles (one commercial and three prototypes) under different filtration superficial velocities. Data and video recordings for all the 705 tests conducted were carefully analyzed to characterize both the height and the dynamics of the expanded bed. Results indicated that the nozzle design had a strong influence on the pressure drop and power required for backwashing. The height of the expanded bed was, however, more dependent on the type of the porous media than of the nozzle design. The most effective combination in terms of energy efficiency and porosity of the expanded bed was obtained with microspheres and the frustoconical nozzle geometry.

Palabras clave: retrolavado; fluidización; filtro granular; riego por goteo; filtración rápida

1. Introducción

La filtración utilizando medios granulares como la arena es una tecnología empleada en multitud de procesos. En agricultura, los filtros de arena presurizados se usan para evitar la obturación de los goteros de los sistemas de riego localizado, cada vez más utilizados por su mayor eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, la implementación de sistemas de riego por goteo aumenta el consumo de energía en comparación con los métodos tradicionales de riego por superficie [1]. Por lo tanto, los nuevos desarrollos tecnológicos de los filtros de medio poroso que mejoren su

eficiencia de retención de partículas y que también reduzcan su consumo de energía contribuirán a una mayor adopción del riego por goteo.

Un ciclo de filtrado consta de dos modos: filtración y contralavado. En el modo de filtración, el flujo se dirige hacia abajo a través del lecho filtrante donde se retienen las partículas contaminantes. En el modo de contralavado, el flujo se invierte para fluidizar el lecho poroso y transportar las partículas previamente retenidas fuera del filtro, limpiando así el medio [2]. La eficiencia del modo de filtración en filtros de arena para riego ha sido estudiada por distintos investigadores [3-5] ya que es fundamental para determinar el correcto funcionamiento del filtro. En cambio, el modo de contralavado ha recibido mucha menos atención. Recientemente, se ha estudiado el retrolavado de tres filtros comerciales utilizando arenas con tres granulometrías distintas y tres alturas del lecho para diferentes velocidades superficiales (caudal dividido por la sección transversal del filtro) [6]. Otros autores han desarrollado una ecuación analítica para calcular la altura del lecho expandido en función de la velocidad superficial de un filtro de arena construido a escala a partir de uno comercial para riego [7]. Sin embargo, las variaciones de fluidización causadas por el elemento de drenaje de los filtros no han sido analizadas en profundidad. Por este motivo, el propósito del presente estudio ha sido el de ampliar el conocimiento del proceso de contralavado considerando los efectos del tipo de drenaje inferior en la expansión del lecho filtrante, la caída de presión y la dinámica del medio poroso a través de análisis de imágenes.

2. Materiales y Métodos

2.1. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental (Figura 1) consistió en dos depósitos de 100 L de capacidad dispuestos en paralelo, desde donde una bomba centrífuga (Prisma 20/4, ESPA, Banyoles, España) impulsaba el agua hasta un filtro de arena de laboratorio escalado a partir de un filtro comercial. El filtro, de 200 mm de diámetro interno y 785 mm de altura total [8], disponía de una ventana rectangular de polimetilmetacrilato (PMMA) que permitía visualizar y medir la expansión del lecho filtrante durante el proceso de contralavado. El caudal se ajustó utilizando una válvula de globo y se determinó con un caudalímetro electromagnético (AFT25, G-Flow, Galapagar, España, ± 1% de precisión). La presión y la temperatura se registraron tanto en las tuberías de entrada como en las de salida del filtro mediante dos manómetros digitales (Leo Record, Keller, Winterthur, Suiza, ± 0,05 % de precisión). La tubería de salida del agua de contralavado se conectó en serie con un filtro de malla (Regaber, Parets del Vallès, España) de 165 mm de diámetro interior y 130 µm de nivel de filtración, que se colocó para retener aquellos granos de arena

que pudieran haber sido arrastrados por el contralavado y evitar que entraran en los depósitos de agua donde se cerraba el circuito (Figura 1). El proceso de expansión del lecho se registró con una cámara de vídeo (HDR-CX105E, Sony, Tokio, Japón).

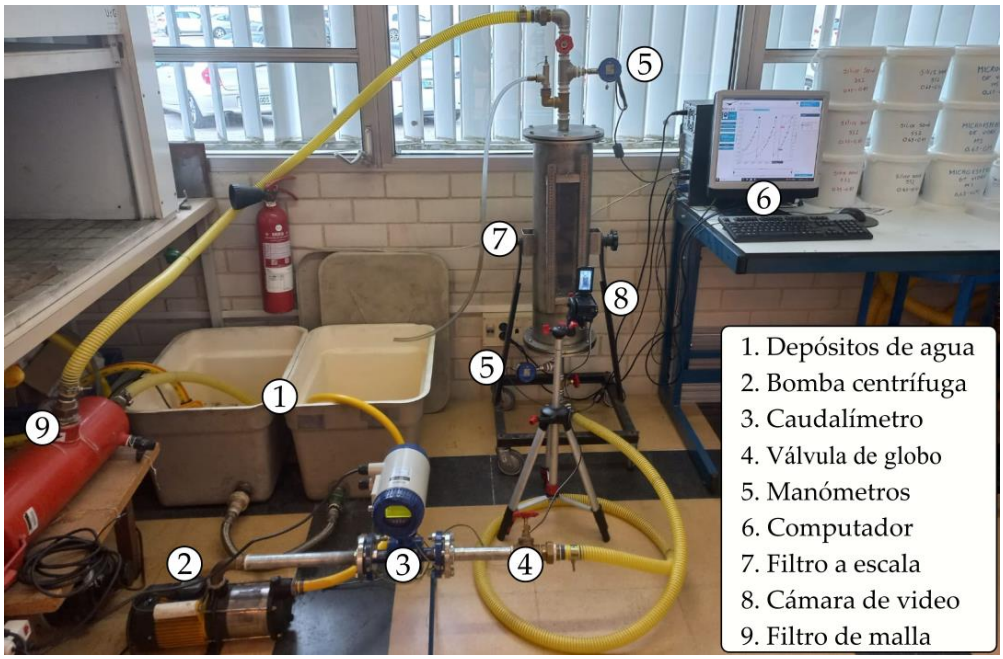


Figura 1. Dispositivo experimental para realizar el contralavado del filtro en circuito cerrado.

2.2. Medios filtrantes

En los experimentos, se utilizaron tres medios filtrantes: arena silícea con granos de diámetro entre 0,75 y 0,85 mm (AS1), arena silícea de diámetro entre 0,63 y 0,75 mm (AS2) y microesferas de vidrio de granulometría entre 0,63 y 0,75 mm (ME). Los distintos medios se obtuvieron por tamizaje en el laboratorio.

2.3. Drenajes de los filtros

Se utilizaron cuatro modelos distintos de drenaje que se muestran en la Figura 2. El drenaje troncocónico comercial (Regaber, Parets del Vallès, España) estaba construido con polipropileno (PP) y contenía 45 ranuras rectangulares de 0,40 mm de ancho y 30 mm de largo, que proporcionaban una superficie de paso de 540,0 mm2 (Figura 2a). El drenaje 2 (Figura 2b) era cilíndrico y tenía el mismo número de ranuras (45) que el comercial, pero de 0,45 mm de ancho y 30 mm de largo, dando una superficie de paso de 607,5 mm2. El drenaje 3 (Figura 2c) también disponía del mismo número de ranuras y dimensiones que el drenaje 2 pero distribuidas de forma diferente, con 33 ranuras alrededor de la superficie cilíndrica y 12 ranuras ubicadas en la superficie superior. Finalmente, el drenaje 4 (Figura 2d) tenía un 40% más de ranuras que los drenajes 2 y 3, con 63 ranuras de iguales dimensiones que

en los diseños 2 y 3 pero distribuidas únicamente en el lateral, proporcionando una superficie de paso de 805,5 mm2. Los drenajes 2, 3 y 4 se fabricaron en acero inoxidable.

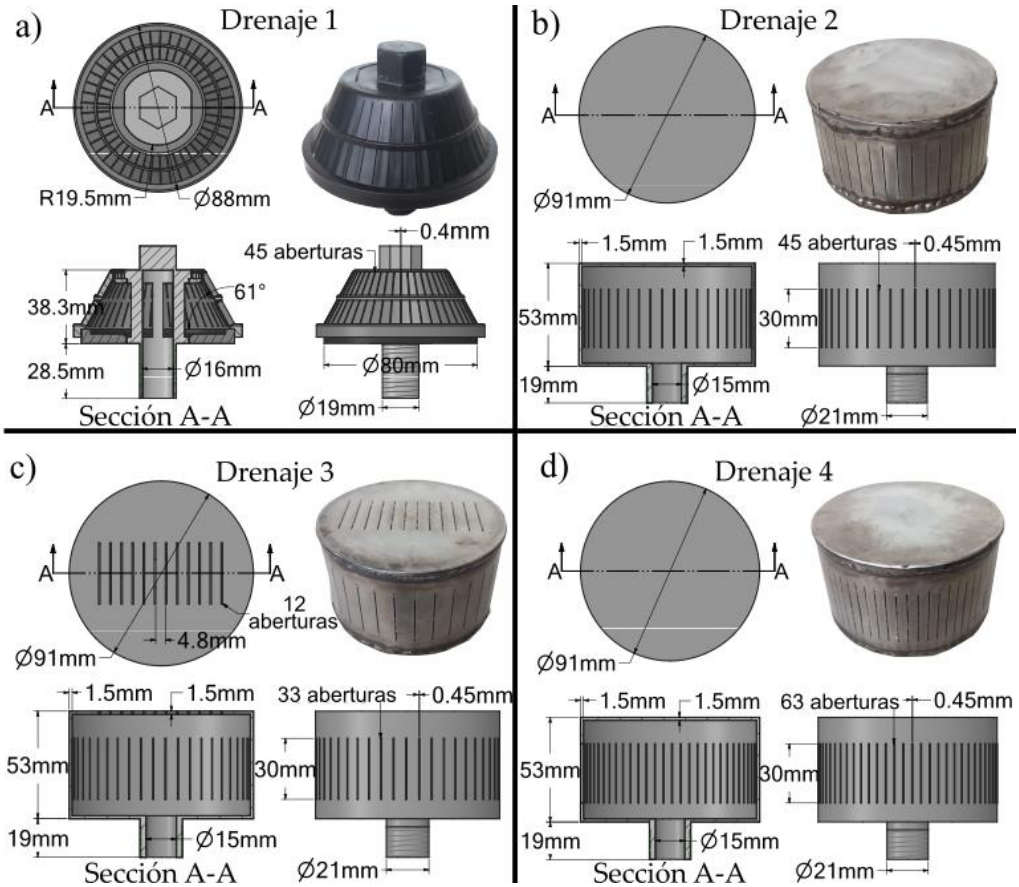


Figura 2. Drenajes utilizados: a) drenaje 1: drenaje comercial de 540,0 mm^2 de superficie de paso; b) drenaje 2: mismo número de ranuras que el drenaje 1 pero con 607,5 mm^2 de superficie de paso; c) drenaje 3: mismo número de ranuras que los drenajes 1 y 2, e igual superficie de paso que el drenaje 2; y d) drenaje 4: 40% más de ranuras que los drenajes 1, 2 y 3 y 805,5 mm^2 de superficie de paso.

2.4. Procedimiento experimental

En los experimentos se ensayaron un total de 24 combinaciones (4 drenajes, 3 medios porosos y 2 alturas iniciales de lecho filtrante) con diferentes velocidades superficiales de filtración para caracterizar la expansión del lecho y la caída de presión del filtro. Cada una de las combinaciones experimentales se ensayó por triplicado.

Antes de iniciar cada prueba, se hizo circular agua de red por el medio poroso en régimen de circuito abierto y se determinó la turbidez del agua a la salida del filtro de malla con un turbidímetro portátil (HI 93703, Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EE. UU.). El valor máximo de turbidez del agua permitido para iniciar los experimentos de contralavado fue de 1,5 FNU [9]. En caso de superar este valor, se

hacía funcionar el filtro en circuito abierto durante 5 min más y se volvía a medir la turbidez del agua, repitiéndose esta operación hasta cumplir con el requisito de turbidez antes mencionado. Después, se cerraba el sistema de contralavado conectando la salida de agua del filtro de malla al tanque de recirculación, se llenaba el filtro con agua y, una vez en reposo, se ponían a cero los manómetros para eliminar la presión estática. A continuación, se iniciaban las pruebas experimentales.

Los manómetros digitales fueron programados para registrar la presión a intervalos de 1 s. La cámara de vídeo se configuró para registrar cada experimento. En primer lugar, se ajustó la válvula de globo al caudal objetivo y se esperó a que el caudal se estabilizara. A continuación, se registraron los datos de expansión del lecho y presión del filtro para su análisis posterior. El caudal inicial se estableció en 10 L min-1, y se fue incrementando a intervalos de 5 L min-1, con un total de 11 valores hasta alcanzar el caudal máximo de 63 L min-1. Dividiendo el caudal por la sección transversal del filtro se obtenía la velocidad superficial, que varió de 19 a 120 m h-1. Para cada caudal ensayado, se elevó la posición de la cámara digital para visualizar la parte superior del lecho expandido al mismo nivel horizontal. La ventana de PMMA fue el factor limitante para medir la expansión del lecho, por lo que algunos experimentos finalizaron con caudales inferiores al caudal máximo previsto, ya que el lecho expandido ya había alcanzado la zona superior de la ventana. El procedimiento anterior se repitió tres veces para cada configuración, realizándose un total de 705 pruebas.

2.5. Tratamiento de los datos

La expansión del lecho poroso E se calculó con la ecuación:

$$E = \frac{H - H_i}{H_i} \cdot 100 \qquad (1)$$

siendo H es la altura del lecho expandido con respecto a la placa base, y Hi para i = 1, 2 es la altura inicial del lecho filtrante respecto a la placa base (200 mm para i=1 y 300 mm para i=2). Las grabaciones de vídeo de todas las 705 pruebas se analizaron para identificar la expansión máxima del lecho (H) a intervalos de 1 s, generando un conjunto de 30 imágenes por prueba.

La caída de presión en el filtro Δp se calculó con la diferencia entre los valores de presión a la entrada y a la salida del filtro. Al igual que en el análisis de expansión, la presión se midió utilizando 30 puntos para cada nivel de caudal.

3. Resultados

Como era previsible, la expansión del lecho poroso (E) y la caída de presión (Δp) fueron aumentando conforme se incrementaba la velocidad superficial (vs). La Figura 3 muestra los resultados obtenidos con la arena silícea de tamaño entre 0,63 y 0,75 mm. Con la arena de mayor granulometría y las microesferas de vidrio, los resultados siguieron la misma tendencia general, aunque con algunas diferencias. En concreto, la velocidad mínima de fluidización de las microesferas de vidrio (con un rango de tamaño entre 0,63 y 0,75 mm) fue de 15 m h-1, la de la arena de menor tamaño (0,63-0,75 mm) estuvo entre 19 y 28 m h-1, y la de arena de mayor granulometría (0,75-0,85 mm) entre los 30 y 40 m h-1. La menor velocidad de fluidización observada con las granulometrías más pequeñas se explica por su menor densidad [10] y diámetro de las partículas [11]. Esto conllevó que las expansiones máximas del lecho (113%) se hallaron con las microesferas de vidrio, seguidas de la arena silícea de 0,63-0,75 mm (87%) y, por último, de la arena de 0,75-0,85 mm (53%). Con la arena de mayor granulometría y una altura del lecho inferior (200 mm), el drenaje 4 presentó la velocidad de fluidización mínima más elevada puesto que la mayor superficie de paso del drenaje 4 dificultó el inicio de la fluidización con respecto a los otros drenajes.

Aunque teóricamente la expansión del lecho filtrante debe ser independiente de su altura inicial, se observaron algunas diferencias debidas al efecto del drenaje en la dinámica de fluidización. En general, los drenajes que tenían únicamente aberturas laterales (drenaje 1 y, particularmente, los drenajes 2 y 4, Figura 2), presentaron expansiones ligeramente superiores con 200 mm de altura de lecho que con 300 mm debido a que la dinámica del flujo provocó una intensa recirculación hacia las paredes del filtro. El vigor de este movimiento ascendente se redujo cuando se incrementó la altura del lecho debido a que el flujo debía recorrer más distancia de medio filtrante. Se debe tener en cuenta que el efecto de las paredes del filtro sobre la dinámica de fluidización del medio filtrante no sería tan relevante en filtros comerciales como consecuencia de tener secciones de paso mayores al disponer de más elementos de drenaje. En el caso del drenaje 3, que tenía algunas ranuras ubicadas directamente en la parte superior del drenaje (Figura 2c), el flujo desde las aberturas superiores sostuvo el lecho de arena que se encontraba por encima, sin disminuir el impulso del flujo lateral. Este fenómeno favoreció la uniformidad de la expansión del lecho, especialmente con los escenarios con una altura de 300 mm que se expandieron ligeramente por encima de los de 200 mm para el mismo valor de caudal únicamente para el drenaje 3. El modelo 4 de drenaje alcanzó el mayor porcentaje de expansión del lecho con la arena de mayor granulometría, lo que indicó que el incremento del área de paso en un 40% respecto los drenajes 2 y 3

únicamente penalizó la expansión a bajas velocidades superficiales. En cambio, para los otros medios, con menor densidad y tamaño, el drenaje comercial 1 fue el que mostró un porcentaje de expansión del lecho más elevado.

La caída de presión en función de la velocidad de filtración superficial presentó una tendencia cuadrática, que no se vio afectada por las diferencias de altura del medio filtrante. Si bien la caída de presión que se determinó fue la del todo el filtro, las diferencias se debieron únicamente al efecto de la geometría del drenaje, puesto que el resto de los elementos donde se producía pérdida de carga tenían las mismas características. La caída de presión de los drenajes cilíndricos (drenajes 2 a 4) prácticamente fue la misma, mientras que la del drenaje comercial (drenaje 1) fue siempre la menor para los tres tipos de medio estudiados. La explicación podría estar en la sección transversal trapezoidal que tenían las paredes cónicas del drenaje 1, que permitían concentrar el flujo de contralavado hacia las aberturas. Este diseño podría evitar el efecto de contracción que podía ocurrir en los drenajes cilíndricos en los que las aberturas estaban simplemente perforadas en la superficie interior de acero inoxidable. Sin embargo, se deberían realizar simulaciones mediante dinámica de fluidos computacional para confirmar la existencia de este efecto dinámico.

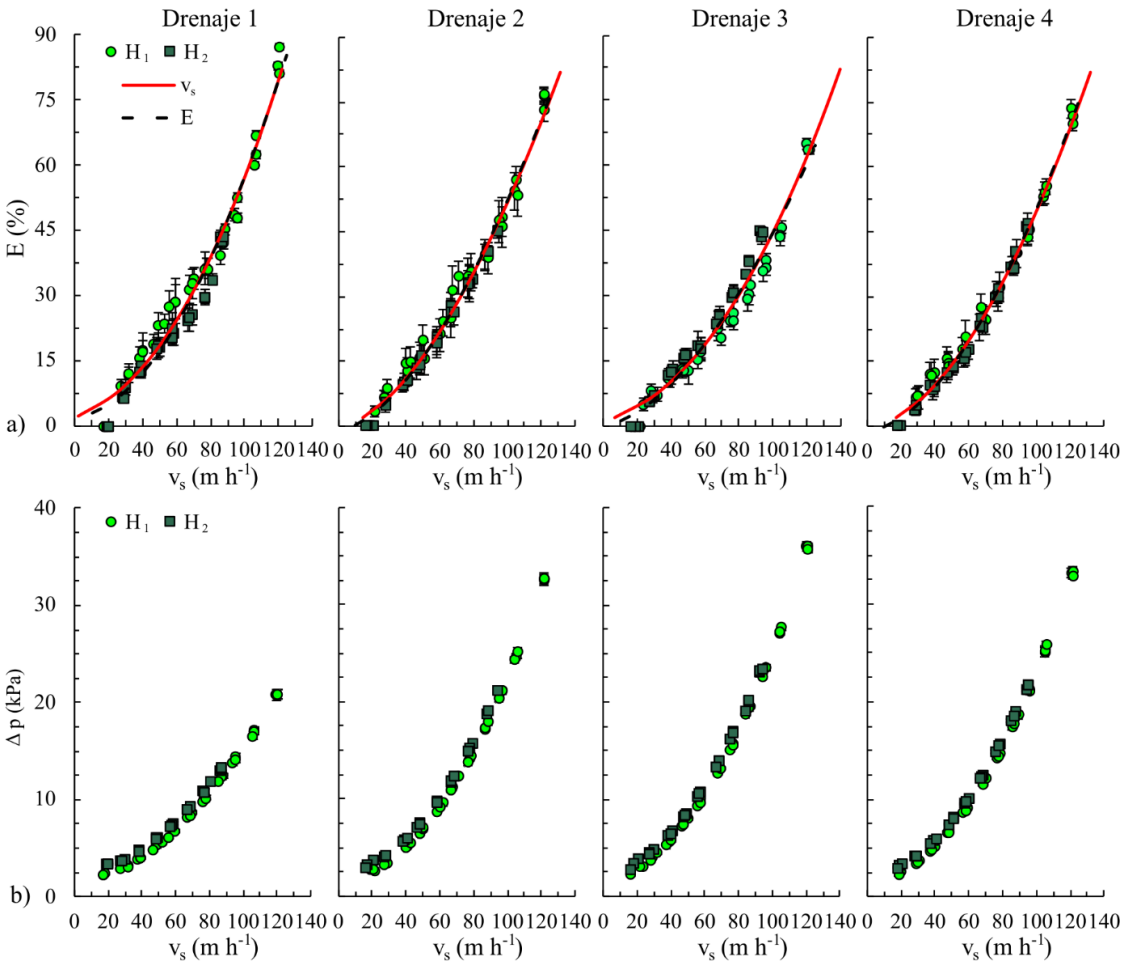


Figura 3. Valores medios (± error estándar) de a) expansión del lecho (*E*) y b) caída de presión en el filtro (Δp) con arena silícea de diámetro entre 0,63 y 0,75 mm para los 4 drenajes experimentados y las dos alturas de lecho (H_1= 200 mm y H_2= 300 mm) en función de la velocidad superficial (v_s).

4. Discusión

4.1. Potencia hidráulica

La potencia hidráulica (Ph) necesaria para contralavar el filtro de arena es fundamental para dimensionar adecuadamente la bomba necesaria y evaluar los costos operativos. La potencia hidráulica se calculó a partir de:

$$P_h = \Delta p \cdot Q \qquad (2)$$

siendo Δp la caída de presión total del filtro y Q el caudal objetivo. Dado que Q es lineal con la velocidad superficial vs y Δp se comporta de manera cuadrática con vs (Figura 2), Ph tendería a comportarse como una función cúbica de vs.

Efectuando regresiones potenciales entre la expansión del lecho y la velocidad superficial para los valores experimentales obtenidos con los distintos medios y diseño de drenajes, se pudo determinar la expansión del lecho E en función de la potencia hidráulica Ph (Figura 4). Se puede observar que la arena silícea de mayor granulometría requirió más potencia para alcanzar la misma expansión del lecho. En cambio, las microesferas de vidrio fueron más eficientes en términos de potencia necesaria para alcanzar un nivel de lecho fluidizado dado, destacando el drenaje comercial respecto los otros diseños. Para todos los escenarios, sin embargo, se producía un mismo patrón en las etapas iniciales, donde un aumento rápido de la expansión del lecho (hasta un 15% aproximadamente) demandó valores de potencia muy bajos. Para expansiones de lecho superiores al 20%, la relación dejó de ser lineal, lo que indicaba que era necesaria más potencia para aumentar la expansión del lecho un determinado valor. Las microesferas de vidrio se comportaron mejor que la arena de igual granulometría (0,63-0,75 mm), lo que indica la importancia de disponer un medio filtrante homogéneo con un coeficiente de esfericidad muy alto para el modo de contralavado. Sin embargo, esta característica de forma del medio puede reducir la eficiencia de eliminación de sólidos durante el filtrado, ya que medios con partículas angulosas son más efectivos [12], lo que genera dudas acerca de la idoneidad de las microesferas de vidrio como medios porosos en filtros para riego [5].

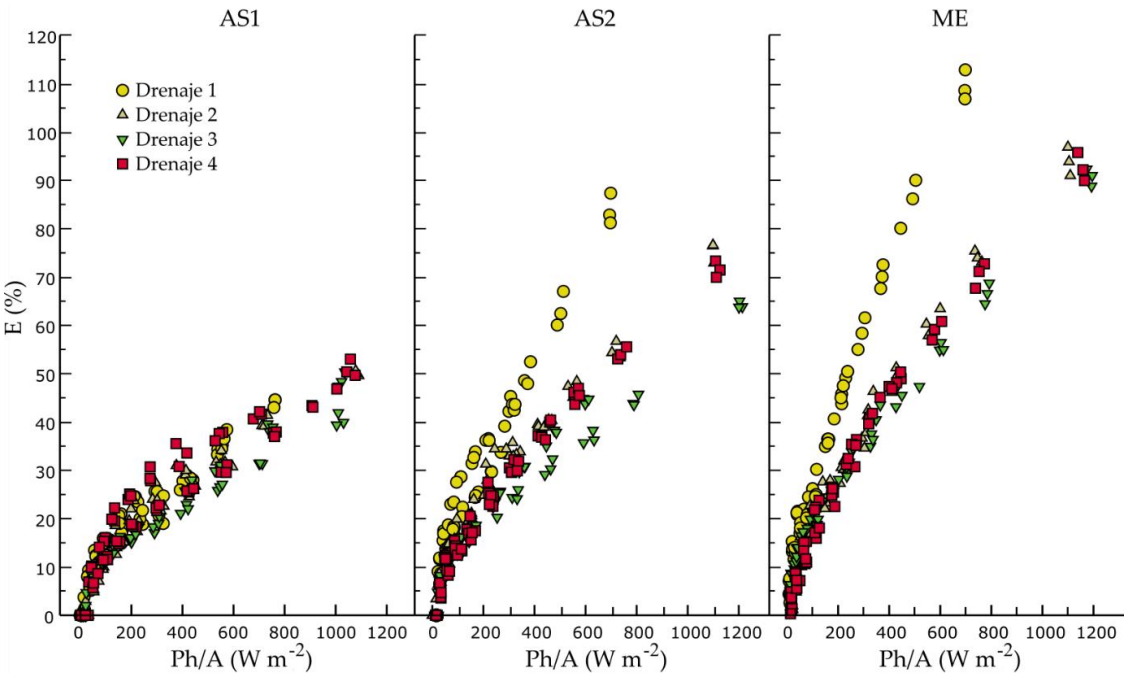


Figura 4. Expansión del lecho filtrante (*E*, %) en función de la potencia hidráulica requerida por unidad de área transversal de los distintos drenajes con arena silícea de 0,75-0,85 mm (AS1), arena silícea de 0,63-0,75 mm (AS2) y microesferas de 0,63-0,75 mm (ME).

4.2. Análisis hidrodinámico

La visualización de la dinámica del lecho fluidizado permitió observar las diferencias causadas por los distintos elementos de drenaje del filtro (Figura 5). A velocidades superficiales elevadas (> 90 m h-1) y para las dos granulometrías de arena silícea, los drenajes 2 y 4, que tenían exclusivamente ranuras en la superficie cilíndrica, exhibieron fuertes vórtices que incluían regiones vacías en su interior. A velocidades superficiales intermedias, también se observaron vórtices de intensidad más reducida en el drenaje 3, pero únicamente con la arena silícea. Uno de estos vórtices, por ejemplo, se puede ver claramente en la Figura 5 para el drenaje 3 con la arena de 0,63 a 0,75 mm a una velocidad superficial vs alrededor de 68 m h-1 (punto negro rodeado por una flecha roja). Para velocidades similares, este comportamiento no se observó con el drenaje 1, muy probablemente debido al componente ascendente inclinado de la dirección del flujo. El flujo de agua a la salida de los drenajes 2 y 4 se dirigió radialmente e impactó con las paredes del filtro moviéndose hacia arriba. Como el flujo en el centro del filtro en la parte superior del drenaje estaba en reposo, las diferencias en la intensidad del flujo generaron un cizallamiento que condujo a un movimiento vortiginoso. En comparación, el componente ascendente distinto de cero a la salida de las ranuras en los drenajes 1 y 3 redujo la probabilidad de ocurrencia de fuertes estructuras vortiginosas. Al mismo tiempo, las ranuras superiores en el drenaje 3 probablemente generaron un efecto volcánico, especialmente para el caso de baja altura del lecho de arena a altas velocidades superficiales, donde la región central en la parte superior del medio presentó un efecto de burbujeo con partículas de arena que alcanzaron niveles más altos que los encontrados cerca de las paredes del filtro (ver AS1 del drenaje 3 en la Figura 5). Las imágenes revelaron que la expansión del lecho no se desarrolló de manera homogénea hasta que se alcanzó un cierto valor de velocidad superficial. Las pruebas con medios de arena tuvieron más probabilidades de evolucionar a patrones de flujo que combinaban regiones con remolinos muy vigorosos con aquellos casi en reposo a lo largo de toda la columna del lecho, aunque fue más probable que ocurrieran movimientos intensos en zonas cercanas a la altura superior del lecho granular. En comparación, las expansiones del lecho con la microesfera de vidrio tendieron a ser más homogéneas y los regímenes con superficie constante en la parte superior del lecho expandido se alcanzaron a tasas de flujo de contralavado más bajas que con la arena silícea.

El estudio de la desviación estándar de los valores de altura del lecho fluidizado reveló que la variabilidad de los datos dependía del caudal, del tipo de drenaje, de la altura inicial del medio poroso y del tipo de medio poroso. Para una configuración de filtro dada (drenaje, altura inicial del lecho y tipo de medio poroso), la desviación estándar alcanzó un máximo en los caudales intermedios. De hecho, se esperaba

que la superficie en la parte superior del lecho poroso tendiera a ser muy lisa para las condiciones de flujo débil cerca de la velocidad mínima de fluidización, así como para las condiciones de flujo vigoroso capaces de sostener un lecho homogéneo. Entre ambos, había un régimen de flujo que proporcionaba la desviación máxima de la medición de la altura del lecho fluidizado. Para todos los drenajes y alturas iniciales, el lecho con microesferas de vidrio requirió una velocidad superficial menor (próxima a 45 m h-1) para alcanzar la condición de máxima variación que los casos de arena de sílice. Para los medios de arena, los casos AS2 generalmente alcanzaron la variabilidad más alta de la superficie superior con menores velocidades superficiales que para los medios AS1, con valores que fueron mucho más dependientes del drenaje que para las pruebas con microesferas. Los caudales que proporcionaron el máximo en la variabilidad de la altura medida del lecho superior no coincidieron necesariamente con los que causaron los remolinos más intensos. Por ejemplo, AS1 presentó los remolinos más intensos con vs de 77 m h-1, 87 m h-1, 68 m h-1 y 97 m h-1, para los drenajes 1, 2, 3 y 4 respectivamente (escenarios con altura de medio H1). Como se esperaba, las pruebas con alturas de lecho iniciales bajas (H1) presentaron más variabilidad del conjunto de datos del lecho de expansión que aquellas con la altura más alta (H2).

Se puede argumentar que las condiciones de fuerte variabilidad en la parte superior del lecho favorecieron el movimiento de los granos y, por lo tanto, la eliminación de partículas del lecho poroso. Pero observaciones cuidadosas de los registros indicaron que estas variaciones máximas de la altura del lecho superior no fueron necesariamente seguidas por una recirculación continua y vigorosa en todo el medio. Por ejemplo, el drenaje 3 tenía algunas de las ranuras apuntando directamente hacia arriba, lo que transfirió altas cantidades de momento a los granos ubicados en la región superior del lecho, mientras que otras regiones permanecieron mucho menos activas. De hecho, la dinámica del medio estuvo lejos de ser uniforme en los casos con fluidización incipiente, con la existencia de zonas casi inmóviles cuya ubicación dependía de la geometría del drenaje. Un régimen de lecho fluidizado totalmente uniforme ideal para eliminar partículas retenidas en todo el medio se observó para aquellos caudales en la Figura 5 que tenían bajas desviaciones de la altura del lecho más allá del valor máximo. Estas condiciones se alcanzaron a velocidades superficiales más bajas para las microesferas que para los casos de arena de sílice. Nótese que, para todos los diseños de drenaje, las microesferas alcanzaron rápidamente la condición de máxima variabilidad de la superficie superior del lecho (que generalmente coincidió con los regímenes con remolinos más intensos marcados con líneas verticales discontinuas y punteadas en la Figura 5), que se suavizaron gradualmente a medida que aumentaba el caudal.

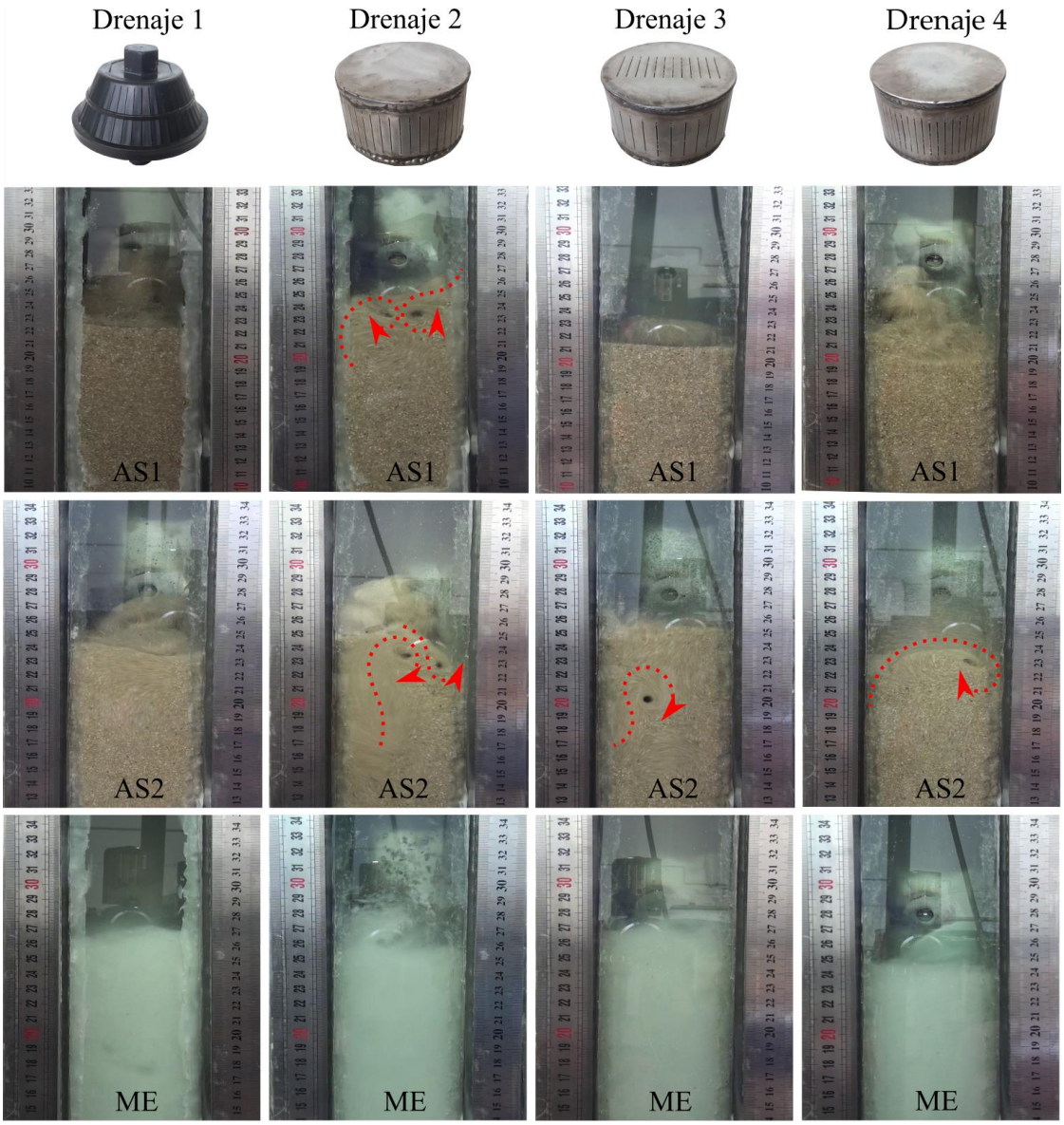


Figura 5. Imágenes del lecho expandido para los distintos drenajes y tipos de medio (AS1: arena silícea de 0,75-0,85 mm, AS2: arena silícea de 0,63-0,75 mm, ME: microesferas de vidrio de 0,63-0,75 mm) a una velocidad superficial de 68 m h^{-1}. Las flechas rojas indican la circulación en los vórtices observados con núcleos vacíos.

El presente trabajo se ha realizado en condiciones de operación similares a la de los filtros comerciales, pero con un filtro de laboratorio construido a escala, cuyo principal factor limitante son sus dimensiones, ya que solo permitía el uso de un único elemento de drenaje inferior.

5. Conclusiones

La caída de presión de los filtros fue superior en los drenajes prototipos cilíndricos que en el drenaje comercial troncocónico, aunque este último tenía menos superficie de paso, pero con un diseño que evitaba la contracción repentina del flujo de agua durante el contralavado. La geometría del drenaje afectó a la altura del

lecho expandido en los experimentos con la altura inicial más baja (200 mm) pero no cuando se aumentó la altura a 300 mm.

El diseño del drenaje influyó claramente en la dinámica del lecho fluidizado. Los dos drenajes con ranuras verticales solo permitieron la existencia de patrones de recirculación fuertes combinados con regiones de baja intensidad que, a velocidades superficiales de moderadas a altas, pudieron desarrollarse en vórtices con núcleos vacíos cuando el medio filtrante era arena silícea. En comparación, el drenaje cilíndrico con algunas ranuras horizontales en su parte superior desarrolló una región central burbujeante en la parte superior del lecho expandido con un movimiento granular reducido en la periferia. Sin embargo, debe destacarse que algunos detalles de los patrones observados anteriormente pueden diferir en los filtros comerciales debido a la influencia de los elementos de drenaje contiguos.

La expansión del lecho aumentó casi linealmente con la velocidad superficial hasta los 120 m h-1 con la arena silícea de mayor tamaño (0,75-0,85 mm). Para los tamaños de grano más pequeños, la tendencia fue casi lineal hasta velocidades superficiales de 40 m h-1. Aunque se realizaron experimentos con arena de sílice y microesferas de vidrio de igual tamaño, las microesferas se expandieron más para los mismos caudales debido a su mayor esfericidad, que también contribuyó a un comportamiento más homogéneo de este medio. El efecto del tipo de medio en la caída de presión producida durante el contralavado fue irrelevante.

La variabilidad de la altura del medio expandido se incrementaba a medida que aumentaba la velocidad superficial hasta un punto en el que la variabilidad disminuyó gradualmente indicando la aproximación continua a un lecho completamente homogéneo. Ese punto casi coincidió con la velocidad superficial que produjo los remolinos más intensos. Las microesferas alcanzaron esta condición antes que la arena silícea, lo que implica que se disponía de un lecho bastante homogéneo a velocidades superficiales más bajas.

La potencia hidráulica por unidad de área requerida para alcanzar un nivel determinado de expansión del lecho por encima del 20% dependía en gran medida tanto del tipo de medio como, en particular, del diseño del drenaje. Los resultados indicaron que la combinación de microesferas de vidrio con el drenaje troncocónico era la más eficiente energéticamente. El efecto del tipo de drenaje disminuía a medida que aumentaba el tamaño de grano del medio.

Por último, las decisiones de diseño de los filtros que se tomen a partir de los hallazgos presentados deben basarse en un análisis integral de todo el ciclo de filtración, que obviamente debe incluir el modo de filtración. En términos del tipo

de medio poroso, por ejemplo, la eficiencia de retención de sólidos probablemente surgiría como el parámetro de decisión principal, de modo que probablemente se descartarían los medios esféricos por su menor eficiencia en la retención de partículas.

Contribuciones de los Autores: Conceptualización, T.P., J.G.-U., M.D.-R. y J.P.-B.; metodología, J.G.-U., M.D.-R y T.P.; análisis formal, J.G.-U. y T.P.; investigación, J.G.-U., M.D.-R., T.P., G.A., F.R.d.C y J.P.-B.; recursos, T.P. y J.P-B.; curación de los datos, J.G.-U. y T.P.; redacción—preparación del borrador original,, J.G.-U., J.P.-B. y T.P..; redacción—revisión y edición, J.P.-B., M.D.-R., T.P., G.A., J.G.-U. y F.R.d.C.; supervisión, T.P. y J.P-B.; administración del proyecto, J.P-B.; adquisición de financiación, J.P-B. Todos los autores han leído y han aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación fue financiada por la Universitat de Girona (Proyecto PONT2022/03) y por la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (PID2023-147561OB-I00).

Declaración del Comité de Ética: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de Disponibilidad de Datos: Los datos presentados en este estudio se pueden solicitar al autor de correspondencia.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer al Ayuntamiento de Celrà su ayuda para realizar este experimento.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

1. Tarjuelo, J.M.; Rodríguez-Díaz, J.A.; Abadía, R.; Camacho, E.; Rocamora, C.; Moreno, M.A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agric. Water Manag*. **2015**, 162, 67–77. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.009
2. Burt, C.M. Hydraulics of Commercial Sand Media Filter Tanks Used for Agricultural Drip Irrigation. In *ITRC Report No. R 10001. Irrigation Training and Research Center*; California Polytechnic State University: San Luis Obispo, CA, USA, 2010.
3. Mesquita, M.; de Deus, F.P.; Testezlaf, R.; Diotto, A.V. Removal Efficiency of Pressurized Sand Filters During the Filtration Process. *Desalin. Water Treat*. **2019**, *161*, 132–143. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24285.
4. Duran-Ros, M.; Pujol, J.; Pujol, T.; Cufí, S.; Arbat, G.; Ramírez de Cartagena, F.; Puig-Bargués, J. Solid Removal across the Bed Depth in Media Filters for Drip Irrigation Systems. *Agriculture* **2023**, *13*, 458. https://doi.org/10.3390/agriculture13020458.
5. Song, L.; Cai, J.; Zhai, G.; Feng, J.; Fan, Y.; Han, J.; Hao, P.; Ma, N.; Miao, F. Comparative Study and Evaluation of Sediment Deposition and Migration Characteristics of New Sustainable Filter Media in Micro-Irrigation Sand Filters. *Sustainability* **2024**, *16*, 3256. https://doi.org/10.3390/su16083256.
6. de Deus, F.P.; Mesquita, M.; Salcedo Ramirez, J. C.; Testezlaf, R.; de Almeida, R.C. Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation. *Biosyst. Eng*. **2020**, *192*, 188-198. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.019,
7. Graciano-Uribe, J.; Pujol, T.; Hincapie-Zuluaga, D.; Puig-Bargués, J.; Duran-Ros, M.; Arbat, G.; Ramírez de Cartagena, F. Bed expansion at backwashing in pressurised porous media filters for drip irrigation: Numerical simulations and analytical equations. *Biosyst.Eng.* **2022**, *223*, 277–294. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.09.008.
8. Graciano-Uribe, J.; Pujol, T.; Duran-Ros, M.; Arbat, G.; Ramírez de Cartagena, F.; Puig-Bargués, J. Effects of porous media type and nozzle design on the backwashing regime of pressurised

porous media filters. *Biosyst. Eng*. **2024**, *247*, 77-90. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.09.005.
9. *EN 16713-1:2016*; Domestic Swimming Pools—Water Systems—Part 1: Filtration Systems—Requirements and Test Methods. CEN: Bruselas, Bélgica, 2016.
10. Bové, J.; Arbat, G.; Duran-Ros, M.; Pujol, T.; Velayos, J.; Ramírez de Cartagena, F.; Puig-Bargués, J. Pressure drop across sand and recycled glass media used in micro irrigation filters. *Biosyst. Eng*. **2015**, *137*, 55–63. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.009.
11. McCabe, W.; Smith, J.; Harriott, P. Unit operations of chemical engineering McGraw-Hill: Boston, MA; EE.UU., 2001.
12. Hunce, S. Y.; Soyer, E.; Akgiray, Ö. . Use of filterability index in granular filtration: effect of filter medium type, size and shape. *Water Supply* **2019**, *19*(2), 382-391. https://doi.org/10.2166/ws.2018.083.

A GESTÃO DOS NUTRIENTES EM CAMPOS DE ARROZ NO VALE DO BAIXO MONDEGO

Rosinda Pato1, Daniel Chongo2, Filomena Gomes3, Sérgio Oliveira1, José Manuel Gonçalves1,3*

[1] Escola Superior Agrária de Coimbra, Centro de Estudos de Recursos Naturais Ambiente e Sociedade (CERNAS), Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal

[2] Professor visitante, Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra, Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal

[3] Centro de Estudos de Recursos Naturais Ambiente e Sociedade (CERNAS), Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal*

Autor correspondente: jmmg@esac,pt

Resumo: O Vale do Baixo Mondego, localizado na Região Centro de Portugal, abrange uma área agrícola de cerca de 13 000 hectares, com destaque para as culturas de milho, arroz e hortícolas. A produção de arroz ocupa cerca de 7 000 hectares, envolvendo 6 300 agricultores, com uma produção anual de 28 000 toneladas. Entre as décadas de 1970 e 1990 foi implementado o "Plano de Aproveitamento da Bacia do Mondego", com o principal objetivo de regularizar o caudal do rio Mondego, estabelecer sistemas de drenagem e irrigação, além de promover uma reorganização agrária. Este projeto possibilitou a otimização da ocupação agrícola e a mecanização da agricultura de regadio no Vale do Baixo Mondego.

Atualmente a cultura de arroz continua a ser relevante, em particular nas áreas com o nível freático mais elevado, sendo praticada a rega por alagamento em canteiros de nível. O clima na região é mediterrânico, classificação Csb de Köppen, com precipitação média anual de 900mm, verões temperados e praticamente sem chuva e invernos chuvosos com temperaturas amenas e os solos são classificados como Fluvissolos. Considerando as características específicas dos solos de arrozal, está em curso um estudo de monitorização das suas características para uma adequada gestão de nutrientes. Foram selecionadas seis explorações representativas do Vale do Baixo Mondego (Vale central e Vales periféricos, situadas a montante, zona média e jusante) e foram colhidas amostras compósitas de solo em 12 parcelas, à profundidade de 0-30cm e 30-60cm (N=24). A caracterização físico-química centrou-se na análise granulométrica, condutividade elétrica, pH, matéria orgânica, fósforo e potássio extraíveis, complexo de troca, azoto orgânico e mineral, micronutrientes extraíveis, cloretos, arsénio e potencial redox. Os resultados revelam que as características dos solos dependem da localização das parcelas no Vale do Baixo Mondego e não existem diferenças significativas entre as profundidades amostradas. No geral, os solos apresentam textura franco-arenosa a montante e argilosa a jusante, pH entre 4,8 e 7,9, teores médios em matéria orgânica, teores muito altos em cloretos e sódio de troca e um complexo de troca onde predomina o Ca^{2+} (70,8%±17,6) e o Mg^{2+} (19,8%±1,7), enquanto o K^{+} representa 2,3% (±4,3) (±4,3). A jusante, os solos apresentam teores mais elevados de matéria orgânica, azoto mineral, potássio extraível e arsénio. A monitorização deste agroecossistema é fundamental para a implementação das melhores práticas de gestão do solo e da água, adequadas às especificidades de cada exploração, considerando a sua localização no Vale do Baixo Mondego, para maximizar a competitividade da cultura.

Palavras-chave: agroecossistema arrozal, alagamento, drenagem, fertilidade.

1. Introdução

O arroz é uma das culturas alimentares mais importantes do mundo, sendo a terceira maior cultura cerealífera, depois do trigo e do milho e servindo de alimento base para mais de um terço da população mundial. A produção média mundial de arroz nas campanhas 2020/21 e 2022/23 foi de 523,3 Mt [1] e de 1,595Mt na União Europeia, em 2023 (0,3% da produção mundial) [2].

Em Portugal, a área de cultivo é de cerca de 28 000ha, com uma produção de arroz com casca de 160 000t (média dos últimos 5 anos), ocupando a 4ª posição da União Europeia, depois da Itália, Espanha e Grécia e é o país europeu com maior consumo, cerca de 18 kg hab. ano-1. É cultivado ao longo dos estuários dos rios Tejo e Sorraia (55% da área), Sado (25% da área) e Mondego (20% da área) [3], [4].

O Vale do Baixo Mondego corresponde a uma extensa planície aluvionar, atravessada longitudinalmente pelo rio Mondego, em que o perímetro de rega é constituído pelo Vale Central entre as cidades de Coimbra e Figueira da Foz e pelos Vales secundários que convergem neste troço do rio - rios Cernache, Ega, Arunca e Pranto, na margem esquerda, e Ançã e Foja na margem direita [5], [6]. Apresenta uma superfície agrícola útil (S.A.U.) de 12 286ha, onde predominam as culturas de milho, arroz e hortícolas, ocupando o Vale principal cerca de 7 178ha (58,4%), enquanto os Vales secundários somam 5 108ha (41,6%). O arroz ocupa uma área de 7 000ha, envolve 6 300 agricultores e apresenta uma produção anual de 28 000toneladas [3], [4], [7].

O Vale do Baixo Mondego apresenta um histórico de inundações e consequente assoreamento dos campos do Mondego, sendo realizadas intervenções desde o século XV com o objetivo de reduzir a erosão a montante e o assoreamento a jusante, culminando num plano hidroagrícola parcialmente finalizado em 1985. Esse plano contemplou a construção de várias barragens e o desenvolvimento agrícola da região, através de operações de emparcelamento, construção de redes secundárias de rega, de drenagem e viárias [5], [6].

O sistema de produção do arroz em Portugal está associado ao cultivo em canteiros nivelados com submersão permanente, antes da sementeira, sendo mantido o nível de cerca de 10cm durante o ciclo de crescimento da cultura, com drenagem antes da colheita. Nestes sistemas de produção, as características do solo e a sua fertilidade são aspetos determinantes para uma eficiente gestão de nutrientes.

As condições de alagamento eliminam oxigénio da rizosfera e promovem alterações nas propriedades químicas do solo, concretamente, com efeito no pH, no potencial redox, força iónica, condutividade elétrica, disponibilidade de nutrientes e de arsénio [8]. O potencial redox e o pH são considerados os principais fatores que afetam a fertilidade dos solos de arroz cultivado com alagamento [9]. No geral, o pH dos solos ácidos aumenta e o pH dos solos alcalinos diminui e tende a para o neutro (6,6 a 7,5). Ocorre um aumento da disponibilidade de fósforo (P), potássio (K), silício (Si), ferro (Fe), manganês (Mn) e molibdénio (Mo) e uma diminuição da disponibilidade de enxofre (S), zinco (Zn) e cobre (Cu) [8]. Relativamente ao arsénio (As), no agroecossistema arrozal por alagamento, existe um aumento dos teores no solo e, consequentemente, uma maior acumulação na planta [10], [11].

As limitações de fertilidade do solo são consideradas as mais relevantes, salientando-se as deficiências de azoto (N), fósforo disponível (P), enxofre (S) e zinco (Zn) [12]. Em Portugal é referido que a cultura apresenta alta sensibilidade à carência de Cu e Zn e média sensibilidade à carência de magnésio (Mg) [13]. É referido que a produtividade do solo nos arrozais é afetada pelo nível muito baixo em nutrientes (35,8Mha), pH muito baixo (27,1Mha) e a elevada fixação de fósforo (8,1Mha) [14]. A gestão integrada dos nutrientes é crucial para a sustentabilidade da produção vegetal como revelam os estudos sobre ensaios a longo prazo, permitindo a monitorização das variações do rendimento das culturas e dos fatores associados [14].

São vários os fatores que afetam o crescimento da cultura e a sua produção potencial (fatores climáticos, fatores do solo e fatores culturais), que são interdependentes e que obrigam a uma gestão adequada para aumentar significativamente a produtividade agrícola. Atualmente os fatores climáticos poderão condicionar a produtividade, mas os fatores culturais e de solo poderão ser geridos de forma a maximizar a produtividade. Neste contexto, e no âmbito do projeto PROMEDRICE, pretende-se caracterizar a fertilidade físico-química dos solos de arroz do Vale do Baixo Mondego, avaliar o seu potencial produtivo e otimizar a gestão de nutrientes, para conseguir um maior rendimento da cultura.

2. Materiais e Métodos

to da cultura.

2. Materiais e Métodos

O estudo sobre a fertilidade do solo e a gestão de nutrientes na cultura de arroz está a ser realizado no Vale do Baixo Mondego, que integra a Bacia hidrográfica do Mondego e insere-se na Região Centro de Portugal (NUT III, Região de Coimbra).

Nesta região, o clima é mediterrânico, Csb na classificação de Köppen [15], com uma precipitação média anual cerca de 900mm, com verões temperados e suaves e invernos chuvosos com temperaturas amenas [16]. Os solos são, maioritariamente, classificados como Fluvissolos [17].

As parcelas que integram o estudo foram selecionadas de forma representar o enquadramento no Vale (montante, terço médio e jusante, Vale central e Vales periféricos), as caraterísticas do solo, a irrigação e as práticas culturais associadas à produção de arroz neste Vale (Figura 1, Tabela 1).

Figura 1. Enquadramento da Bacia Hidrográfica do Baixo Mondego (SNIRH, 2025, https://snirh.apambiente.pt/, consultado em 3 de abril de 2025) e localização geográfica áreas de estudo no Vale do Baixo Mondego (Google Maps, https://maps.google.pt (acedido a 8 de abril de 2025); Legenda (montante para jusante: AM2, AM3 - Tentúgal; QF1, QF2 - Vale do Foja; JN3, JN5 - Montemor-o-Velho; QSA1, QSA3 - Vale do Arunca; QC1, QC2 - Quinta do Canal; QSP2, QSP3 - Vale do Pranto.

Tabela 1. Informação relativa às parcelas de arroz em estudo no Vale do Baixo Mondego.

Enquadramento	Montante		Médio						Jusante			
	Vale periférico direito		Vale central		Vale periférico direito		Vale periférico esquerdo		Vale central		Vale periférico esquerdo	
Parcela	AM2	AM3	JN3	JN5	QF1	QF2	QSA1	QSA3	QC1	QC2	QSP2	QSP3
Área (ha)	1,21	3,43	2,85	3,07	18,38	23,13	6,00	9,59	3,26	1,64	3,17	2,0
Altitude (m)	8,5	8,0	3,0	3,0	2,5	2,5	5,0	5,0	2,0	2,0	3,80	2,0

Em 2024, antes da campanha da cultura, foram colhidas amostras compósitas de solo em seis explorações agrícolas e em 12 parcelas, à profundidade de 0-30cm e 30-60cm, num total de 24 amostras.

A caracterização físico-química das amostras de solo foi realizada através da análise dos seguintes parâmetros: análise granulométrica (areia, limo e argila, %) com classificação textural (USDA, NRCS); pH (H_2O) 1:5 (v/v); condutividade elétrica (CE, mS/cm), condutimetria,1:2, p/v); carbono orgânico (CO, %), combustão seca e deteção por IV; matéria orgânica (MO, %), COx1,724 - fator de van Bemmelen; azoto (N, %), método Kjeldahl ; azoto amoniacal (mg $N\text{-}NH_4^+$ kg^{-1}), extração em água e doseamento por espectrofotometria UV-VIS; azoto nítrico (mg $N\text{-}NO_3^-$ kg^{-1}), extração em água e

doseamento por potenciometria; fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) extraíveis (mg kg^{-1}), extração com molibdato de amónio em meio ácido e ácido ascórbico e doseamento por EAM (P_2O_5) e EAA com chama (K_2O); complexo de troca (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, CTC, $cmol_+$ kg^{-1}), extração com cloreto de hexamina cobalto III e doseamento por ICP-OES; micronutrientes extraíveis (Cu, Zn, Fe, Mn, mg kg^{-1}), extração com ácido acético glacial+nitrato de amónio+fluoreto de amónio+ácido nítrico+ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) (Mehlich-3); cloretos (Cl, mg kg^{-1}), espectrofotometria UV-VIS; arsénio (As, mg kg^{-1}), extração em água régia e doseamento por ICP-OES; potencial redox (Eh, mV), eletrometria.

Na análise estatística foi utilizado o programa STATISTICA 12.0, com a realização das seguintes análises: 1) avaliação do tipo de distribuição das variáveis dependentes; 2) para as variáveis com distribuição normal (limo, P_2O_5, Ca^{2+}, Na^+, As e Fe), realizou-se a análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste de Tukey ($p<0,05$) quando foram observadas diferenças significativas; 3) para as variáveis não paramétricas (areia, argila, pH, CE, MO, N Kj., K_2O, Cl, K^+, CTC, Eh e Mn), as médias foram comparadas pelo teste de Kruskal-Wallis; 4) regressão linear múltipla, para avaliar a relação entre diferentes variáveis, considerando a argila, limo, pH (H_2O), CE, MO, Eh, Enquadramento no Vale do Baixo Mondego como variáveis independentes (Xi); 5) dendrograma (análise de cluster), para identificar a relação entre as diferentes variáveis observadas (26). Para relacionar variáveis com diferentes valores os dados foram estandardizados (x_i-média) /std [18].

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização físico-química do solo das parcelas de arroz

3.1.1. Análise granulométrica e classificação textural

Verifica-se um aumento da percentagem de limo (0,02-0,002mm) e argila (≤0,002mm) de montante para jusante, com classificação textural de franco-arenosa (AM2, JN3) e franco-argiloso-arenosa (AM3, JN5). Na zona média do Vale do BM predominam solos com textura franco-argilosa (QF3, QSA3) e argilosa (QC1, QC2) e a jusante, solos com textura argilosa (QSP2, QSP3) (Figura 2).

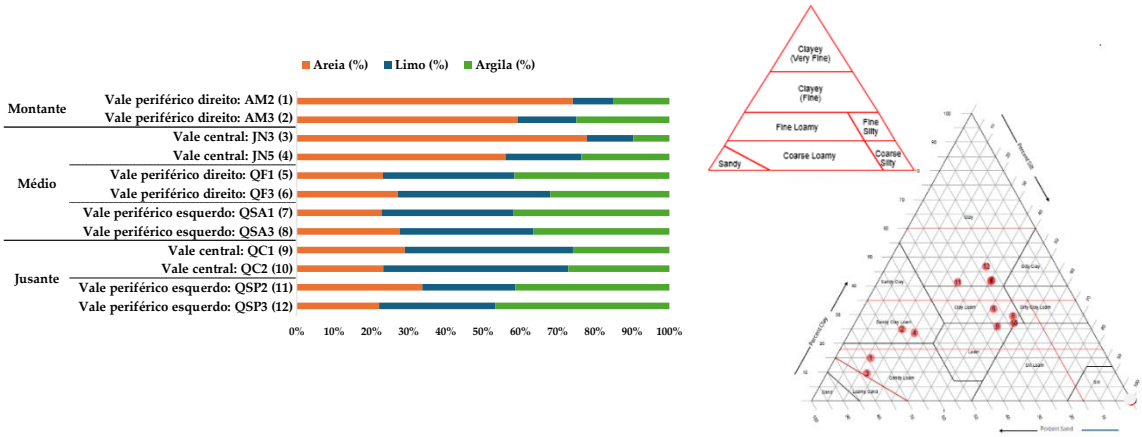


Figura 2. Análise granulométrica (% areia, % limo e % de argila, valores médios das amostras colhidas a 0-30 e 30-60cm) e respetiva classificação textural (USDA system) relativa às amostras de solo das parcelas amostradas no Vale do Baixo Mondego (1-AM2, 2-AM3, 3-JN3, 4-JN5, 5-QF1, 6-QF2, 7-QSA1, 8-QSA3, 9-QC1, 10-QC2, 11-QSP2, 12-QSP3).

Estes resultados indicam que a textura do solo será adequada á cultura do arroz na maioria das parcelas, permitindo a realização de um alagamento eficiente e a retenção de nutrientes no agroecossistema arrozal. No entanto, as parcelas com textura franco-arenosa e franco-argiloso-arenosa deverão ser monitorizadas para avaliar o potencial produtivo para esta cultura. Refere-se que a textura do solo, e em particular o teor em argila, influencia a retenção e a disponibilidade de nutrientes, a sua absorção pelas plantas, a produção de matéria seca e a produtividade do arroz [19].

3.1.2. Caracterização físico-química das amostras de solo

A caracterização físico-química das amostras de solo colhidas nas parcelas amostradas no Vale do Baixo Mondego está patente na Tabela 2, de acordo com o seu enquadramento no Vale. Refere-se que não existem diferenças significativas entre as profundidades amostradas, 0-30cm e 30-60cm, apresentando-se os valores médios.

O pH (H2O) das amostras apresenta valores médios mais baixos a jusante (4,8 e 5,5, ácido) relativamente a montante (7,3, neutro). Na zona central do Vale, existe grande variabilidade, desde 5,3 (ácido, QF1, QF2), 7,4 (neutro, JN3, JN5) e 7,9 (pouco alcalino, QSA1, QS3). Refere-se que estes valores não se situam na faixa de pH considerada mais favorável para a cultura, entre 5,5 e 6,5 [13]. O pH do solo do arrozal está normalmente próximo do pH da água de rega utilizada [19]. No Vale do Baixo Mondego a água geralmente utilizada é captada no rio Mondego e distribuída pelo sistema de rega e apresenta valores de pH entre 7,0 e 8,3. Um estudo realizado em

7 explorações no vale do Baixo Mondego, revela que o pH da água de rega, de furos subterrâneos, apresenta valores que variam de 5,1 a 7,0 [20].

Relativamente ao teor de matéria orgânica, os valores são significativamente superiores no Vale periférico direito (4,82%), relativamente a montante (1,50%) e à zona média-Vale central (1,71%). No geral, predominam teores baixos (1,5% - 2,0%) e médios (2,1% - 4,0%), salientando-se que teores <3,5% são considerados como um valor crítico abaixo do qual ocorre deterioração da estrutura do solo [13].

A condutividade elétrica apresenta valores significativamente inferiores nas parcelas localizadas a montante do Vale (0,32mS cm-1), relativamente às parcelas localizadas a jusante (0,84mS cm-1), devido à sua cota inferior (Tabela 1). Os resultados revelam também que os solos são Não Salinos, porque apresentam pH<8,5, Na+<15% e CE<4mS/cm [13]. No entanto, refere-se que as parcelas do Vale central-zona média (QF1, QF2) e a Vale central-jusante (QC1, QC2) apresentam no complexo de troca a maior percentagem de sódio (12,3% e 10,5%). Refere-se que o arroz apresenta maior sensibilidade à salinidade na fase de plântula, fase reprodutiva inicial, na polinização e formação de sementes, enquanto a germinação, afilhamento e maturação são as fases menos sensíveis [21].

O fósforo extraível apresenta grande variabilidade nas parcelas estudadas, com teores baixos (49 mg kg-1) na zona média-Vale periférico direito e teores altos (162 mg kg-1) na zona média-Vale central. O potássio extraível apresenta teores muito altos (>200mg kg-1) na zona média-Vale periférico direito e a jusante.

No complexo de troca, predomina o Ca2+ (70,8%±17,6) e o Mg2+ (19,8%±1,7), enquanto o K+ representa 2,3% (±4,3). Esta relação Ca:Mg:K é similar às de outros estudos (70,8:24,5:1,5 e 60-80%: 10-20%: 1-5%) [13], [19].

O teor de zinco, na maioria das amostras, é baixo, verificando-se teores médios nas amostras QC (3,02-3,81mg Zn kg-1) e teores altos nas amostras QF (4,67-6,04 mg Zn kg-1). Os teores médios de cobre extraível variam de 0,52 a 2,72 mg Cu kg-1, ocorrendo os valores mais elevados nas parcelas AM2 (2,72±1,46 mg kg-1) e QSA1 (2,59±0,09 mg kg-1) e QSA3 (2,38±0,57 mg kg-1). Os teores mais baixos de cobre ocorrem nas parcelas QF1 (0,93±0,64 mg kg-1), QF2 (0,52±0,17 mg kg-1), QC1 (0,89±0,63) e QC2 (0,74±0,48 mg kg-1). É importante que o solo apresente teores adequados em zinco e cobre extraíveis, porque a planta de arroz apresenta alta sensibilidade à carência nestes micronutrientes. Valores elevados de pH, >6,5, promovem uma diminuição da sua disponibilidade, formando-se compostos insolúveis que não são absorvidos pelas raízes [13]. A longo prazo, nos sistemas de produção de arroz, ocorre uma diminuição da disponibilidade dos teores em

micronutrientes no solo, sendo importante também monitorizar os teores em matéria orgânica, azoto (N), fósforo (P) e ferro (Fe), porque apresentam uma correlação positiva com o rendimento da cultura [14].

Relativamente ao teor em arsénio (As), as parcelas a jusante-Vale central (QC1, QC2), apresentam teores médios significativamente superiores (21,75±3,40 mg kg-1) relativamente às restantes parcelas. Verifica-se que as parcelas com o maior teor em Mn, apresentam o menor teor em As e o pH mais elevado. Em sistemas produtivos de arroz com teores elevados em Mn, ocorre uma inibição na solubilidade do As devido ao pH mais alto. A gestão da água nos campos de arroz é uma estratégia que promove uma redução do As disponível na solução do solo, devido à quase completa re-oxidação do Fe e Mn dissolvidos em FeO e MnO. Solos com Eh de -73 mV e pH de 6,2 apresentam condições que promovem uma redução da disponibilidade de As e Cd [22], [23]. Ocorre um efeito inibitório competitivo entre o fosfato (HPO42-) e o As(V) no solo ou no interior das plantas, o que está de acordo com a Tabela 2. O HPO42- e o As5+ entram nas células pelo mesmo transportador, interferindo o As5+ no metabolismo do fósforo. Estes elementos também competem pelos mesmos locais de adsorção nas placas de ferro das raízes (formadas a partir da oxidação do Fe), que tem afinidade pelo As5+ e HPO42- funcionando como depósito ou fonte desses compostos, dependendo das condições físico-químicas do solo [24]. Os solos com maior potencial redox estão associados a maiores teores em Fe3+ e também a um maior teor de As e menor teor em P2O5 (Tabela 2) [10], [24].

Tabela 2. Valores médios (media±std) relativos à caracterização solo de acordo com o enquadramento das parcelas de arroz no Vale do Baixo Mondego.

Enquadramento no Vale do Baixo Mondego	Exploração/ Parcelas	n	Areia	Argila	Limo	pH (H_2O)	C.E.	M.O.	N Kj.	P_2O_5	K_2O
			%				$mS\ cm^{-1}$	%		$mg\ kg^{-1}$	
Montante: Vale periférico direito	AM2, AM3	4	66,65 ± 8,64 ^{a}	19,93 ± 5,86 ^{b}	13,42 ± 2,82 ^{d}	7,3 ± 0,1 ^{abc}	0,32 ± 0,06 ^{b}	1,50 ± 0,23 ^{b}	0,11 ± 0,03 ^{b}	150 ± 40 ^{a}	78 ± 18 ^{c}
Médio: Vale periférico direito	QF1, QF2	4	25,11 ± 4,46 ^{a}	36,79 ± 5,69 ^{ab}	38,10 ± 5,79 ^{ab}	5,3 ± 0,0 ^{bc}	0,61 ± 0,16 ^{ab}	4,82 ± 0,98 ^{a}	0,27 ± 0,04 ^{a}	49 ± 21 ^{b}	400 ± 109 ^{ab}
Médio: Vale central	JN3, JN5	4	66,92 ± 16,07 ^{a}	16,64 ± 9,66 ^{b}	16,44 ± 6,52 ^{d}	7,4 ± 0,1 ^{ab}	0,50 ± 0,15 ^{ab}	1,71 ± 0,46 ^{b}	0,12 ± 0,04 ^{b}	162 ± 10 ^{a}	120 ± 31 ^{bc}
Médio: Vale periférico esquerdo	QSA1, QSA3	4	27,70 ± 5,84 ^{a}	36,60 ± 6,24 ^{ab}	35,71 ± 0,91 ^{bc}	7,9 ± 0,1 ^{a}	0,59 ± 0,08 ^{ab}	2,20 ± 0,74 ^{ab}	0,15 ± 0,03 ^{ab}	37 ± 27 ^{b}	177 ± 8 ^{abc}
Jusante: Vale central	QC1, QC2	4	26,08 ± 3,89 ^{a}	26,51 ± 1,02 ^{ab}	47,41 ± 3,47 ^{a}	5,5 ± 0,3 ^{abc}	0,53 ± 0,17 ^{ab}	2,68 ± 0,44 ^{ab}	0,17 ± 0,03 ^{ab}	131 ± 6 ^{a}	543 ± 177 ^{a}
Jusante: Vale periférico esquerdo	QSP2, QSP3	4	27,86 ± 6,72 ^{a}	44,02 ± 3,30 ^{a}	28,12 ± 3,76 ^{c}	4,8 ± 0,2 ^{c}	0,84 ± 0,02 ^{a}	2,63 ± 0,26 ^{ab}	0,14 ± 0,02 ^{ab}	63 ± 6 ^{b}	307 ± 16 ^{abc}
Média geral		24	40,05 ± 20,79	30,08 ± 11,32	29,87 ± 12,83	6,4 ± 1,2	0,56 ± 0,19	2,59 ± 1,22	0,16 ± 0,06	99 ± 55	271 ± 184

Enquadramento no Vale do Baixo Mondego	Exploração/ Parcelas	n	Na^+	Ca^{2+}	CTC	Cl	Fe	Mn	As	Eh
			$cmol+\ kg^{-1}$			$mg\ kg^{-1}$				mV
Montante: Vale periférico direito	AM2, AM3	4	0,19 ± 0,08 ^{d}	10,238 ± 2,51 ^{b}	11,03 ± 2,89 ^{a}	71 ± 21 ^{b}	478 ± 22 ^{c}	18 ± 9 ^{c}	5,53 ± 0,68 ^{d}	-41,25 ± 11,44 ^{ab}
Médio: Vale periférico direito	QF1, QF2	4	2,64 ± 0,27 ^{a}	12,725 ± 0,96 ^{b}	21,75 ± 1,71 ^{a}	709 ± 81 ^{a}	671 ± 69 ^{b}	47 ± 4 ^{ab}	14,75 ± 1,71 ^{b}	104,50 ± 13,72 ^{a}
Médio: Vale central	JN3, JN5	4	0,57 ± 0,27 ^{cd}	8,875 ± 3,11 ^{bc}	11,20 ± 4,40 ^{a}	136 ± 47 ^{ab}	672 ± 73 ^{b}	68 ± 23 ^{ab}	7,88 ± 2,20 ^{cd}	-8,75 ± 13,15 ^{ab}
Médio: Vale periférico esquerdo	QSA1, QSA3	4	0,59 ± 0,06 ^{cd}	17,475 ± 0,50 ^{a}	20,25 ± 0,96 ^{a}	120 ± 28 ^{ab}	457 ± 40 ^{c}	234 ± 6 ^{a}	9,10 ± 0,73 ^{cd}	-63,75 ± 3,10 ^{b}
Jusante: Vale central	QC1, QC2	4	1,10 ± 0,45 ^{bc}	5,630 ± 1,52 ^{c}	10,38 ± 0,75 ^{a}	152 ± 97 ^{ab}	543 ± 55 ^{c}	34 ± 8 ^{bc}	21,75 ± 3,40 ^{a}	58,75 ± 19,62 ^{ab}
Jusante: Vale periférico esquerdo	QSP2, QSP3	4	1,62 ± 0,21 ^{b}	11,115 ± 2,04 ^{b}	20,75 ± 3,77 ^{a}	204 ± 60 ^{ab}	897 ± 13 ^{a}	111 ± 33 ^{ab}	10,05 ± 0,67 ^{c}	103,78 ± 19,24 ^{a}
Média geral		24	1,12 ± 0,87	11,01 ± 4,10	15,89 ± 5,72	232 ± 228	620 ± 159	85 ± 76	11,51 ± 5,72	25,55 ± 69,80

Notas: Nas variáveis paramétricas (limo, P_2O_5, Ca^{2+}, Na^+, As e Fe) foi utilizado o Teste de Tukey;
Nas variáveis não paramétricas (areia, argila, pH-H_2O, CE, MO, N Kj., K_2O, Cl, K^+, CTC, Eh e Mn) foi utilizado o Teste de Kruskal-Wallis;
Letras diferentes nas colunas, indicam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) de acordo com o teste de intervalo múltiplo de Tukey ou Teste de Kruskal-Wallis.

3.2. Relações iónicas entre nutrientes

A Tabela 3 traduz as relações de antagonismo entre nutrientes, permitindo avaliar a disponibilidade de nutrientes e a potencial ocorrência de carências nas plantas [25].

Tabela 3. Relações iónicas (média±dp) entre nutrientes nas amostras de solo das 6 explorações do Vale do Baixo Mondego, associadas à cultura de arroz.

Enquadramento no Vale do Baixo Mondego		Ca/Mg	Ca/K	Ca+Mg/K	Mg/K	Fe/Mn	P/Zn
Montante	**Vale periférico direito: AM2**	**26,0**	**84,1**	**87,3**	**3,2**	**46,6**	**27,4**
	±dp	1,2	2,3	2,3	0,1	5,5	7,2
	Vale periférico direito: AM3	**28,1**	**88,4**	**91,6**	**3,2**	**18,9**	**32,2**
	±dp	5,0	4,7	4,3	0,4	1,6	10,6
Médio	**Vale central: JN3**	**8,2**	**31,7**	**35,2**	**3,6**	**11,5**	**31,6**
	±dp	1,6	29,4	32,3	2,9	1,6	2,9
	Vale central: JN5	**5,5**	**33,1**	**39,4**	**6,4**	**9,5**	**31,2**
	±dp	0,6	25,0	30,3	5,3	3,2	0,6
	Vale periférico direito: QF1	**2,3**	**20,2**	**29,0**	**8,8**	**13,7**	**4,8**
	±dp	0,0	3,0	4,2	1,2	1,9	3,3
	Vale periférico direito: QF3	**2,2**	**22,6**	**32,9**	**10,3**	**14,8**	**3,7**
	±dp	0,3	3,2	3,2	0,0	0,5	1,2
	Vale periférico esquerdo: QSA1	**8,5**	**57,7**	**64,5**	**6,8**	**1,9**	**6,0**
	±dp	0,7	0,2	0,3	0,6	0,1	4,3
	Vale periférico esquerdo: QSA3	**10,2**	**56,8**	**62,4**	**5,7**	**2,1**	**8,7**
	±dp	1,6	0,5	1,5	0,9	0,2	7,6
	Vale central: QC1	**2,4**	**12,5**	**17,4**	**4,9**	**20,5**	**14,9**
	±dp	1,6	10,3	11,4	1,1	2,8	0,5
	Vale central: QC2	**1,5**	**10,2**	**17,1**	**6,9**	**12,7**	**22,7**
	±dp	0,6	4,6	5,1	0,5	2,5	3,5
Jusante	**Vale periférico esquerdo: QSP2**	**1,5**	**24,2**	**39,9**	**15,7**	**10,9**	**8,1**
	±dp	0,0	1,1	2,1	1,1	0,1	1,9
	Vale periférico esquerdo: QSP3	**1,4**	**27,2**	**46,4**	**19,2**	**6,4**	**12,4**
	±dp	0,1	2,8	3,4	0,6	0,5	1,9

Verifica-se uma grande variabilidade nas relações iónicas nas várias parcelas, o que poderá estar associado ao seu enquadramento no Vale e às práticas culturais (concretamente, a fertilização).

As parcelas AM apresentam valores maiores que indicam a maior suscetibilidade das plantas à carência de magnésio, potássio, ferro e manganês. A Ca/Mg é muito baixa e baixa nas parcelas QF, QC e QSP (<2,6), com uma influência muito desfavorável nas características físicas do solo. Em contrapartida, os solos das parcelas a montante (AM), apresentam Ca/Mg muito altas (>8), classificadas de muito desfavoráveis para a nutrição da planta em magnésio. Verifica-se um desequilíbrio entre estes dois macronutrientes secundários, com relações Ca/Mg diferentes da gama considerada adequada (2,6-4,0). Este aspeto é relevante porque o arroz apresenta média sensibilidade à carência de magnésio [13].

O fósforo é um macronutriente que poderá influenciar a absorção e acumulação dos micronutrientes Mn, Fe, Cu e Zn pelas plantas. As P/Zn com valores elevados

estão associadas a altos níveis de P disponíveis no solo (parcelas AM, JN, QC), podendo ser induzida pela aplicação de fertilizantes fosfatados e que poderá originar deficiência de Zn nas plantas. A absorção de zinco pela planta é controlada, principalmente, pelos teores de S, P, CaO e Mn no solo [26]. A co-aplicação dos macronutrientes principais (N, P, K) juntamente com Mg e/ou Zn origina efeitos interativos positivos nos parâmetros relacionados com o rendimento do arroz e, a combinação com Mg e/ou Zn, ajuda a otimizar a eficiência de utilização de cada macronutriente principal [27].

3.3. Regressão múltipla

A Tabela 4 mostra a regressão múltipla entre parâmetros químicos (identificados na coluna à esquerda) em função de características físicas e químicas do solo (sete variáveis independentes xi), sendo ainda mostrados os valores de coeficiente (b associados a cada variável xi), o nível de significância (p value) e o respetivo coeficiente de correlação da regressão múltipla (R).

Tabela 4. Regressão múltipla entre parâmetros químicos e em função de características físicas e químicas do solo (coeficiente b e coeficiente de correlação – R)

Parâmetros	Argila (%)	Limo (%)	pH (H_2O)	C.E. (mS cm^{-1})	M.O. (%)	Eh (mV)	Enq. no Vale BM	R
P_2O_5 (mg kg^{-1})	-0,543*	n.s.	n.s.	n.s.	-0,649*	n.s.	n.s.	0,849
K_2O (mg kg^{-1})	n.s.	0,849**	n.s.	n.s.	-0,445*	1,277**	n.s.	0,928
Ca^{2+} (cmol+ kg^{-1})	0,783**	0,273**	n.s.	0,248*	0,655**	-0,869**	n.s.	0,977
Mg^{2+} (cmol+ kg^{-1})	0,447**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,947
K^+ (cmol+ kg^{-1})	n.s.	0,528*	1,182*	n.s.	n.s.	1,852**	n.s.	0,839
Na^+ (cmol+ kg^{-1})	0,716*	n.s.	n.s.	n.s.	0,319*	1,028**	n.s.	0,961
CTC (cmol+ kg^{-1})	0,808**	-0,222*	n.s.	0,249*	0,524**	n.s.	n.s.	0,965
Cl (mg kg^{-1})	n.s.	n.s.	0,945*	n.s.	0,606**	0,955*	n.s.	0,903
Mn (mg kg^{-1})	0,725**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,810*	-0,387*	0,943
Fe (mgkg^{-1})	0,291*	-0,638**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,379**	0,962
Zn (mgkg^{-1})	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,606**	n.s.	n.s.	n.s.
As (mg kg^{-1})	n.s.	0,903**	n.s.	-0,382**	n.s.	n.s.	-0,189*	0,980

Nota: * P < 5%; ** P < 1%; n.s. - não significativa; R = coeficiente de correlação.

A CTC apresenta uma correlação positiva com o teor em argila e o teor em matéria orgânica, com um contributo maior da presença de argila (b= 0,808**), relativamente à matéria orgânica (b= 0,524**) e, ainda com a CE, provavelmente associado à presença de cálcio e consequentemente a uma maior estabilização dos agregados argilo-húmicos [25]. Assim, o Ca2+ mostra coeficientes positivos para a argila e a matéria orgânica e negativo para o Eh, evidenciando uma relação inversa. O teor em P2O5 mostra coeficientes negativos para a argila e a matéria orgânica, sugerindo, que os solos menos férteis (com menor teor em argila e matéria

orgânica) apresentam maior teor em P2O5, provavelmente associado a práticas culturais de fertilização.

3.4. Dendrograma (análise de cluster)

A Figura 3 mostra a interação (complete linkage) entre as 26 variáveis observadas, a referir: 1) uma ligação consistente e muito próxima entre N-NO3- e o N mineral; 2) estes dois parâmetros estão associados ao teor em P2O5 e ao teor em areia, sugerindo que, em solos menos férteis, terá sido realizada a prática cultural de fertilização para melhorar o nível destes nutrientes; 3) o teor em matéria orgânica está associado ao N Kj, ao teor em Zn e à maior presença de Na+ e Cl, sugerindo que são áreas com maior influência da toalha freática, corroborando a informação da Tabela 4. O teor de Zn apresenta um coeficiente alto e positivo (b= 0,606**) com o teor em matéria orgânica; 4) a capacidade de troca catiónica está associada a solos com maior teor em argila e Ca2+ e Mn, indicando a relevância do cálcio para a estabilização dos agregados argilo-húmicos e o maior contributo do teor em argila para a capacidade de troca catiónica, corroborando o valor do coeficiente na Tabela 5 (b = 0,808**); 4) o pH está relacionado com o grau de saturação em bases; 5) as variáveis k+ e K2O têm uma relação consistente e estão associadas ao teor de limo e arsénio e a solos com matéria orgânica e sob a influência da toalha freática; 6) o enquadramento das parcelas no vale do Baixo Mondego está associado às variáveis como o Eh, CE, Mg2+, Fe e N-NH4+, sugerindo que os solos mal drenados, com excesso de água, promovem a atividade dos microrganismos responsáveis pela desnitrificação, aumentando o teor em N-NH4+ e a redução de Fe (Fe2+) [25], [28], [29].

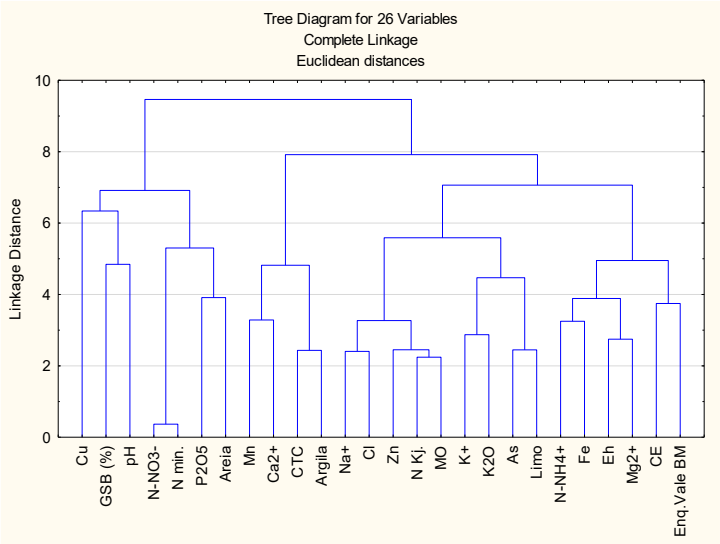


Figura 3. Dendograma que traduz a interação entre as 26 variáveis consideradas no estudo sobre a a fertilidade do solo e a gestão de nutrientes realizado em parcelas de arroz no Vale do Baixo Mondego.

5. Conclusões

As caraterísticas físico-químicas dos solos do Vale do Baixo Mondego variam com enquadramento no Vale. No geral são solos não salinos, mas com teores muito altos em cloretos e sódio de troca, o que poderá indiciar risco de salinização. O pH (H2O) é neutro a montante, ácido a jusante e com grande variabilidade na zona central, não se enquadrando na faixa de pH considerada mais favorável para a cultura (5,5 e 6,5).

Considerando que o pH e o potencial redox são os principais fatores que condicionam a disponibilidade de nutrientes e a fertilidade dos solos de arroz cultivado com alagamento, é importante a monitorização deste agroecossistema para a implementação das práticas adequadas de gestão do solo e da água.

Agradecimento e Financiamento: Os autores agradecem aos proprietários das explorações a autorização para a realização dos estudos de monitorização das parcelas. Este trabalho insere-se no âmbito do projeto PROMEDRICE - "Proteção dos recursos hídricos nos agroecossistemas orizícolas mediterrâneos através de práticas agrícolas eficazes" https://www.era-learn.eu/network-information/networks/prima/section-2-2013-multi-topic-2022/effective-farming-practices-to-protect-water-resources-in-mediterranean-rice-based-agroecosystems

References

1. Food Outlook – Biannual Report on Global Food Markets; FAO, 2024. https://doi.org/10.4060/cd3177en.
2. USDA U.S. Department of Agriculture. Production - Rice. https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0422110 (consultado em 15 04-2025)
3. COTARROZ-Centro de competências do arroz. Campanha Agrícola de 2023. https://www.cotarroz.pt/wp-content/uploads/2024/07/Publicac%CC%A7a%CC%83o-Te%CC%81cnica.pdf (consultado em 20-02-2025).
4. Lima F. Instituto Nacional de Estatística, I. P. Av. António José de Almeida 1000-043 Lisboa Portugal.
5. Santos J. F.; Freitas V. Aproveitamento Hidroagricola do Baixo Mondego. Actualidade e Desafios Futuros. In A Engenharia dos Aproveitamentos Hidroagrícolas – Actualidade e Desafios Futuros. Jornadas Técnicas, APRH. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, EDIA - Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A., DGADR - Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural2012. p. 25-37.
6. Alves E.; Mendes L. Modelação da inundação fluvial do Baixo Mondego. RH 2014, 35 (2), 41–54. https://doi.org/10.5894/rh35n2-4.
7. Gonçalves J. M.; Nunes M.; Ferreira S.; Jordão A.; Paixão J.; Eugénio R.; Russo A.; Damásio H.; Duarte I. M.; Bahcevandziev K. Alternate Wetting and Drying in the Center of Portugal: Effects on Water and Rice Productivity and Contribution to Development. Sensors 2022, 22 (10), 3632. https://doi.org/10.3390/s22103632.
8. Fageria N. K.; Carvalho G. D.; Santos A. B.; Ferreira E. P. B.; Knupp A. M. Chemistry of Lowland Rice Soils and Nutrient Availability. Communications in Soil Science and Plant Analysis 2011, 42 (16), 1913–1933. https://doi.org/10.1080/00103624.2011.591467.
9. Sahrawat K. L. Redox Potential and pH as Major Drivers of Fertility in Submerged Rice Soils: A Conceptual Framework for Management. Communications in Soil Science and Plant Analysis 2015, 46 (13), 1597–1606. https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1043451.
10. Souza J. M. O.; Carneiro M. F. H.; Paulelli A. C. C.; Grotto, D.; Magalhães Júnior, A. M.; Barbosa Júnior, F.; Batista, B. L. Arsenic and rice: toxicity, metabolism, and food safety. Química Nova 2014. https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140279.
11. Yang J.-M.; Chen H.-L.; Wang X.; Guan D.-X.; Ji X.-H.; Xie Y.-H.; Huang R.; Peng B.; Qin Q.-B. Toward Safe Rice Production in As-Cd Co-Contaminated Paddy Soils: Biogeochemical Mechanisms and

Remediation Strategies. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2025, 55 (1), 1–24. https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2373949.
12. Suriyagoda L. B. D. Rice Production in Nutrient-Limited Soils: Strategies for Improving Crop Productivity and Land Sustainability. J. Natn. Sci. Foundation Sri Lanka 2022, 50 (3), 521. https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v50i3.10601.
13. Veloso A.; et al. Manual de Fertilização Das Culturas, 3ª Edição.; Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. - INIAV, 2022.
14. Walia S. S.; Dhaliwal S. S.; Gill R. S.; Kaur T.; Kaur K.; Randhawa M. K.; Obročník O.; Bárek V.; Brestic M.; Gaber A.; Hossain A. Improvement of Soil Health and Nutrient Transformations under Balanced Fertilization with Integrated Nutrient Management in a Rice-Wheat System in Indo-Gangetic Plains – A 34-Year Research Outcomes. Heliyon 2024, 10 (4), e25113. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25113.
15. Köppen W. P. Grundriss Der Klimakunde.
16. IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Normais Climatológicas, 2025. https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/ (accessed 2025-02-15).
17. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps; LCC MAKS Press, 2024. https://doi.org/10.29003/m4174.978-5-317-07235-3.
18. Miller J. N.; Miller J. C. Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry, 6th ed.; Prentice Hall/Pearson: Harlow, 2010.
19. Kasno A.; Setyorini D.; Widowati L. R. Cations Ratio and Its Relationship with Other Soil Nutrients of Java Intensified Lowland Rice. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021, 648 (1), 012015. https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012015.
20. Rocha J.; Oliveira V.; Dias-Ferreira C. Caracterização Físico-Química de Solos e de Água de Rega Em Explorações Agropecuárias Do Baixo-Mondego, Portugal. Projeto SYMBIOSIS; 2021; p 20. https://repositorioaberto.uab.pt/bitstreams/1029f2c7-ec0e-470a-ad53-5497f87482e2/download.
21. Sandesh G. M.; Deepak C. A.; Rajanna M. P. Assessing Salinity Tolerance of Rice Genotypes for Germination and Early Seedling Growth. 2022.
22. Honma T.; Ohba H.; Kaneko A.; Nakamura K.; Makino T.; Katou H. Effects of Soil Amendments on Arsenic and Cadmium Uptake by Rice Plants (Oryza Sativa L. Cv. Koshihikari) under Different Water Management Practices. Soil Science and Plant Nutrition 2016, 62 (4), 349–356. https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1196569.
23. Maguffin S. C.; Abu-Ali L.; Tappero R. V.; Pena J.; Rohila J. S.; McClung A. M.; Reid M. C. Influence of Manganese Abundances on Iron and Arsenic Solubility in Rice Paddy Soils. Geochimica et Cosmochimica Acta 2020, 276, 50–69. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.02.012.
24. Islam Md. S.; Magid A. S. I. A.; Chen Y.; Weng L.; Ma J.; Arafat M. Y.; Khan Z. H.; Li Y. Effect of Calcium and Iron-Enriched Biochar on Arsenic and Cadmium Accumulation from Soil to Rice Paddy Tissues. Science of The Total Environment 2021, 785, 147163. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147163.
25. Havlin J. L. Soil Fertility and Fertilizers; Pearson India, 2016.
26. Geng W.; Li T.; Zhu X.; Dou L.; Liu Z.; Qian K.; Ye G.; Lin K.; Li B.; Ma X.; Hou Q.; Yu T.; Yang Z. Predicting the Zinc Content in Rice from Farmland Using Machine Learning Models: Insights from Universal Geochemical Parameters. Applied Sciences 2025, 15 (3), 1273. https://doi.org/10.3390/app15031273.
27. Anago F. N.; Agbangba E. C.; Oussou B. C. T.; Dagbénonbakin G. D.; Amadji L. G. Magnesium and Zinc Fertilisation Improves Rice Yield and Yield Component Responses to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium. South African Journal of Plant and Soil 2023, 40 (2), 95–107. https://doi.org/10.1080/02571862.2023.2212190.
28. Bongoua-Devisme A. J.; Cebron A.; Kassin K. E.; Yoro G. R.; Mustin C.; Berthelin J. Microbial Communities Involved in Fe Reduction and Mobility During Soil Organic Matter (SOM) Mineralization in Two Contrasted Paddy Soils. Geomicrobiology Journal 2013, 30 (4), 347–361. https://doi.org/10.1080/01490451.2012.688928.
29. Jiang Y.; Zhang S.; Wei R.; Ding, X. Microbial Community Changes during Anaerobic Nitrate Reduction and Fe(II) Oxidation of a Coastal Saline Paddy Soil under Alkaline pH. J Soils Sediments 2022, 22 (10), 2720–2730. https://doi.org/10.1007/s11368-022-03247-3.

Los SIG como herramientas para la localización óptima de hidrantes multiusuario en redes de riego a presión

César González-Pavón[1], Carmen Virginia Palau[2], Juan Manzano Juárez[2]* and Ibán Balbastre Peralta[2,]

1 Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; csagonpa@upv.edu.es

2 Centro Valenciano de Estudios del Riego, CVER , Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; virpaes@agf.upv.es (C.V.P.); juamanju@agf.upv.es (J.M.J.); ibbalpe@agf.upv.es (I.B.-P.)

* Correspondence: juamanju@agf.upv.es

Abstract: El diseño óptimo de las instalaciones de regadío requiere la implementación de metodologías que aseguren tanto una elevada eficiencia hídrica y energética como un bajo coste, tanto en la fase de instalación como en la de operación. Estas redes suelen constar de sistemas de captación, ya sea a través de canales o pozos, una red de distribución que conecta con puntos de suministro denominados hidrantes multiusuario, y una red terciaria que incluye las tomas individuales a las parcelas.

El diseño de las redes de distribución se realiza habitualmente mediante dos enfoques principales: el trazado y ubicación de hidrantes multiusuario, generalmente basado en la experiencia del ingeniero, y el dimensionado hidráulico, para el cual se emplean técnicas de optimización técnico-económicas que minimizan funciones de coste.

Sin embargo, en lo que respecta al trazado y la ubicación de los hidrantes multiusuario, en la mayoría de los casos, estas decisiones se toman con base en criterios subjetivos, sin metodologías técnicas homogéneas ni criterios consensuados que respalden su localización.

Esta disparidad contrasta con el grado de optimización alcanzado en las técnicas empleadas para el dimensionado de las redes de distribución. En consecuencia, existe una notable diferencia entre los procedimientos de optimización aplicados a la red de distribución y los relativos a la ubicación de hidrantes multiusuario, la asignación de parcelas y el dimensionado de estos puntos de suministro.

En este contexto, el presente trabajo propone desarrollar una metodología basada en una función de costes y la utilización de los Sistemas de Información Geográfica y sus geoprocesos, con el objetivo de establecer criterios objetivos para la localización óptima de los hidrantes multiusuario dentro de una red de distribución y la asignación eficiente de parcelas a dichos puntos.

Keywords: Hidrantes multiusuario, SIG, Regadío.

1. Introducción

La gestión del agua ha sido clave en las políticas de riego, evolucionando desde la expansión de infraestructuras hasta la modernización y optimización del uso del recurso [1]. En España, la transformación del regadío tuvo un fuerte impulso en el siglo XX, pero se ralentizó en los años 80 y 90 debido a restricciones presupuestarias [2]. La sequía de 2005-2008 incentivó un Plan de Modernización para mejorar la eficiencia del agua en la agricultura [3].

En las últimas décadas, la optimización de los recursos hídricos ha sido prioritaria, impulsando la sustitución de sistemas tradicionales por redes de riego presurizadas y la incorporación de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en su diseño y gestión [4]–[6]. Este cambio ha permitido una mayor eficiencia en la distribución y aplicación del agua, garantizando el riego a presión y reduciendo el desperdicio.

En el contexto de escasez hídrica, especialmente en la cuenca del Mediterráneo, la optimización en el diseño de redes de riego es clave para mejorar la eficiencia en el uso del agua. La modernización de los sistemas de riego ha permitido sustituir métodos tradicionales por redes presurizadas más eficientes, pero aún persisten desafíos en la planificación de su infraestructura.

El diseño de estas redes debe garantizar tanto una alta eficiencia hídrica como energética, minimizando costos de instalación y explotación. Para ello, se emplean técnicas de optimización en el dimensionado de la red de distribución, pero la ubicación de los hidrantes multiusuario y la asignación de parcelas aún dependen, en muchos casos, de la experiencia del ingeniero sin criterios homogéneos.

Ante esta situación, la presente investigación propone una metodología basada en la utilización de los sistemas de información geográfica (SIG) y funciones de costos para definir de manera objetiva la localización de los hidrantes y la asignación de parcelas, mejorando la planificación de las redes de riego. Este enfoque contribuirá a una gestión más eficiente y replicable en otras zonas con necesidades similares.

2. Material y métodos.

2.1. Casos de estudio.

La metodología aquí expuesta se ha llevado a la práctica y ha sido contrastada en la Comunidad Valenciana, donde el regadío a presión tiene especial importancia La selección de zonas regables busca garantizar que los casos de estudio sean representativos del regadío valenciano y puedan extrapolarse a áreas con

características similares. Para ello, es clave conocer la distribución de cultivos y los sistemas de riego.

En la Comunidad Valenciana, el 55,6 % de la superficie cultivada está en regadío, con parcelas de entre 0,5 y 1,0 ha en promedio. Los cítricos son el cultivo predominante, ocupando el 52 % de la superficie regada. La organización del regadío es mayoritariamente colectiva, con entidades como entidades privadas y Comunidades de Regantes, estas últimas con un fuerte arraigo histórico y un papel clave en la gestión del agua y la modernización de los sistemas de riego.

Para que los resultados del estudio sean aplicables a otras zonas, las áreas seleccionadas deben pertenecer a regadíos consolidados y contar con un grado de parcelación entre 0,25 y 1,25 ha por parcela.

Tabla 1: ***Casos de estudio.***

Caso de estudio	**Sup. (ha)**	**Nº Parcelas**	**Sup. Media (ha)**
Enguera_1	119,52	253	0,47
Enguera_2	126,58	270	0,47
Llíria_1	119,76	149	0,80
Llíria_2	180,83	261	0,69
Palmeral_1	116,80	227	0,51
Palmeral_2	148,76	148	1,01
Picassent_1	120,61	153	0,79
Picassent_2	131,33	172	0,76
Picassent_3	120,32	252	0,48
Picassent_4	120,02	163	0,74
Sellent_1	119,08	256	0,47
Sellent_2	140,70	169	0,83

2.2. Hidrantes multiusuario.

En las redes de distribución comunitarias, los puntos de servicio a las parcelas se suelen agrupar bajo hidrantes multiusuario. Estas estructuras permiten mejorar el diseño y la gestión de la red. Se trata de un elemento hidráulico donde se pueden llevar a cabo las funciones de corte, medición, limitación de caudal y regulación de presión. En este caso se utiliza la tipología conocida como “Costella” donde los contadores de cada toma quedan instalados en posición horizontal con el totalizador también en horizontal. En concreto se trata de la configuración H2-5 con un número máximo de tomas a abastecer de 10 [7]. El caudal circulante por el colector principal del hidrante será el sumatorio de los caudales demandados por

todas las tomas a las que abastece. Este caudal condiciona el diámetro que debe tener dicho colector y, por tanto, el resto de elementos que componen el hidrante.

En la siguiente tabla se proporciona una relación de caudales máximos recomendados para los distintos tamaños de hidrante. Este caudal garantiza que las pérdidas de carga totales están dentro de los valores indicados en la norma [8], así como que la velocidad de circulación no sea superior a 3,0 m/s.

*Tabla 2**: Caudales recomendados en función del DNB.***

DNB hidrante	**Caudal recomendado (m3/h)**
80 mm (3”)	45
100 mm (4”)	70
150 mm (6”)	135
200 mm (8”)	190

Para la selección de los hidrantes, se tomarán los caudales máximos de forma estricta, pasando al siguiente diámetro en caso de superarse.

Por otro lado, el otro condicionante que determina el diámetro del hidrante, es el diámetro nominal de la toma de mayor tamaño. En la siguiente tabla se indican los diámetros de colector (DNB) compatibles con cada diámetro de toma (DNP).

*Tabla 3**: Características del colector. Dimensiones y número de tomas.***

Número y tipo de tomas (DNP) en mm								
DNB (mm)	**100**	**80**	**65**	**50**	**40**	**30**	**25**	**20**
80	-	-	-	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i
100	-	-	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i
150	-	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i
200	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i	x_i

Donde:

- xi: Diámetro de toma valido para el DN del hidrante.
- Diámetro de toma no válido para el DN del hidrante.

Los costes asociados a los hidrantes multiusuario que se tienen en cuenta en la función de costes para optimización de la localización son el colector principal, válvula de compuerta de cierre elástico, válvula de esfera de PVC para manómetro, manómetro, ventosa trifuncional, válvula de esfera para ventosa, válvula hidráulica,

filtro en Y cazapiedras, soporte del colector, conducción de PE100, piezas especiales, mano de obra y caseta de hormigón.

2.3. Tomas a parcela.

Estas conducciones, puesto que únicamente trasiegan el caudal de la parcela, suelen adoptar diámetros discretos. El material más utilizado para su trazado es el Polietileno de densidad 40, 80 o 100. En este caso, se utilizará para el dimensionado el PE100, siendo este el más utilizado en este tipo de instalaciones.

Para el cálculo de los diámetros de las tomas a parcela, es necesario tanto conocer el caudal demandado como su longitud (obtenida mediante SIG). Con estos datos, y partiendo de diferentes criterios hidráulicos, se puede obtener el diámetro que los cumple.

Al tratarse de conducciones de diámetro discreto, una forma de dimensionar las mismas es preestableciendo un valor de pérdida de carga máximo en el tramo [9]. De este modo, cuanto mayor sea este valor menores diámetros se obtendrán, pero mayor presión requerida se deberá garantizar en el hidrante.

Valores normales para este criterio son establecer unas pérdidas de carga máximas que oscilen entre los 2,0 y 5,0 m.c.a [10].

A partir de este valor de pérdidas de carga máximas en el tramo, se obtendría el diámetro teórico. Tras ello, se establecen los siguientes criterios:

- La velocidad del fluido en el interior de la conducción no sea superior a 2,5 m/s. Este criterio se toma con el fin de que tomas de reducida longitud, puedan adoptar diámetros muy bajos que hagan incrementar la velocidad del fluido comprometiendo la integridad de las instalaciones. Velocidades superiores, además de reducir la vida útil de los materiales, hacen aumentar los empujes en los cambios de dirección, lo que puede provocar roturas y fugas en juntas, codos o piezas especiales debido a los transitorios hidráulicos [11].
- La velocidad del fluido no será menor a 0,5 m/s para evitar que en las conducciones se acumulen sedimentos provenientes de la captación de las aguas para riego.

En nuestro caso, las funciones para conducciones de PE100 son las que se muestran en la siguiente gráfica. Se han obtenido para diámetros nominales comprendidos entre 32 mm y 125 mm.

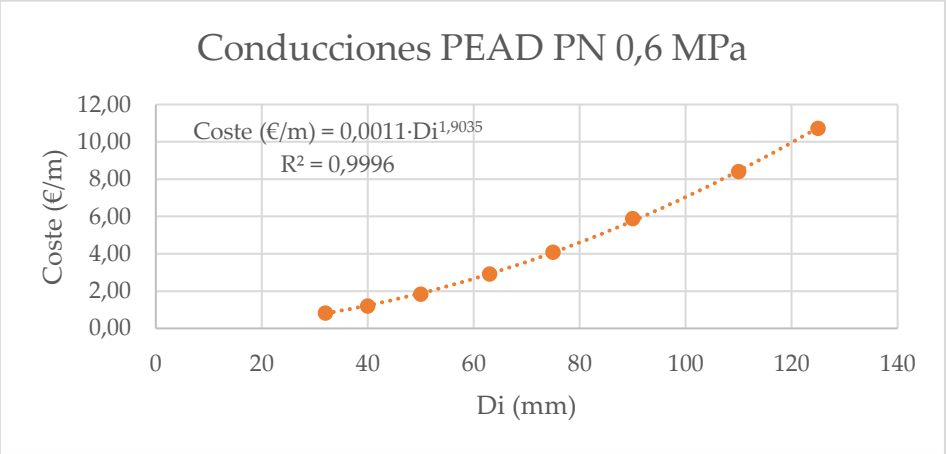


Figura 1: ***Ecuación de costes para tomas a parcela de PE100 PN 0,6 MPa.***

2.4. La red de riego en un entorno SIG.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que permiten gestionar y analizar datos georreferenciados para la toma de decisiones [12]. Su aplicación en la gestión de recursos hídricos es clave para optimizar el uso del agua, especialmente en zonas con escasez [13]. En ingeniería hidráulica, los SIG se han utilizado en el diseño, optimización y simulación de redes de riego [14]. Además, ofrecen funciones avanzadas para la localización óptima de equipamientos mediante análisis espacial y cálculo de distancias. Su capacidad de procesar grandes volúmenes de datos los hace esenciales en la planificación y gestión del territorio [15].

En nuestro caso, la implementación del SIG sobre este estudio nos va a permitir automatizar los siguientes procesos:

- Obtener un punto representativo de cada parcela que nos permita contener en él información de caudal demandado, cota y que sirva como punto de servicio final a parcela de la red terciaria.
- Generar una nube de puntos correspondientes a los hidrantes multiusuario candidatos en las posibles vías de ubicación de los mismos.
- Unir mediante líneas y de forma automática los hidrantes candidatos y las tomas obteniendo las distancias geométricas entre los mismos permitiendo elaborar una matriz distancia.
- Obtener en dichos puntos (tomas e hidrantes multiusuario) las cotas a partir de los modelos digitales del terreno (MDT).

Todos estos procesos automatizados son los que justifican la utilizan de los SIG en este estudio, pues la edición manual de tal cantidad de información llevaría a tiempos de resolución inasumibles y poco prácticos.

En las redes colectivas de riego, la propia instalación colectiva lleva el agua hasta un punto de la parcela del usuario. Este punto es un lugar conocido pues puede depender de la configuración actual del cultivo, de la accesibilidad del mismo o ser un punto cualquiera. En resumen, este punto será un dato conocido y, por tanto, un dato de partida.

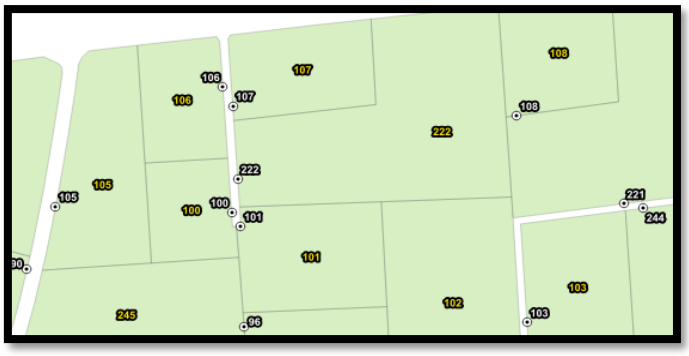


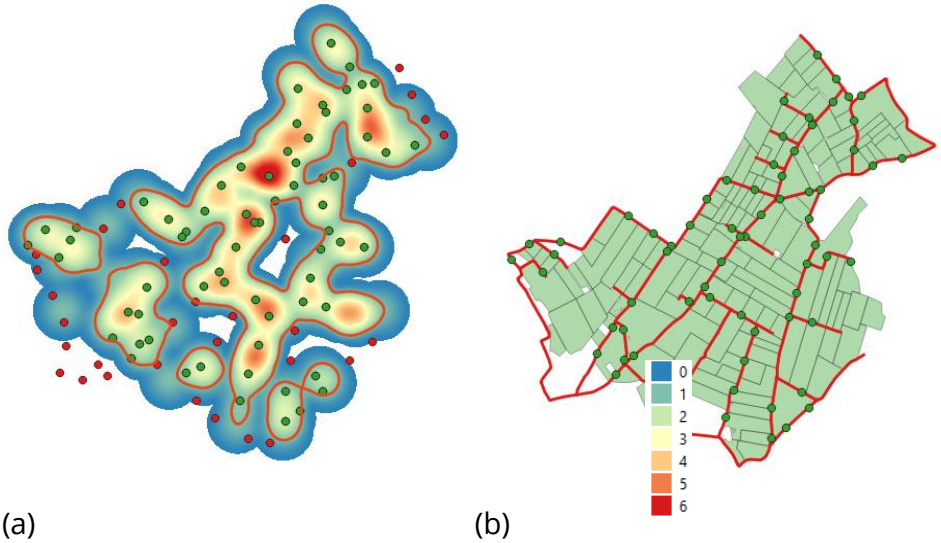
Figura 2: ***Puntos de alimentación de las parcelas regables.***

En este punto se procede a explicar la secuencia metodológica que se sigue para obtener tanto los hidrantes candidatos como las tomas a parcela y como se integra en un SIG para poder llevar a cabo el proceso de optimización.

En primer lugar, se debe obtener una nube inicial de hidrantes candidatos de la cual saldrán los hidrantes definitivos tras el proceso de optimización. Este número de hidrantes candidatos se obtiene de la relación entre la longitud total de caminos disponibles en la red de riego y la longitud máxima de toma que se desea establecer. En este caso, se toma una longitud máxima de toma de 125 m. La utilización de SIG permite realizar una nube equidistante de puntos (hidrantes) de forma automática en los lugares deseados como se puede ver en la siguiente imagen.

Figura 3: ***Hidrantes candidatos sobre la longitud de caminos en la superficie regable en un entorno SIG.***

El segundo paso consiste en evitar que hidrantes multiusuario que estén alejados de la superficie regable y que es muy improbable que pasen a formar parte de la solución final, sean eliminados. Para ello, se utiliza la herramienta SIG conocida como mapa de calor o *heatmap*. Aplicando la distancia máxima de toma, se eliminan aquellos que están a mayor distancia de la considerada. Con esto se consigue reducir los tiempos de ejecución de los siguientes algoritmos.



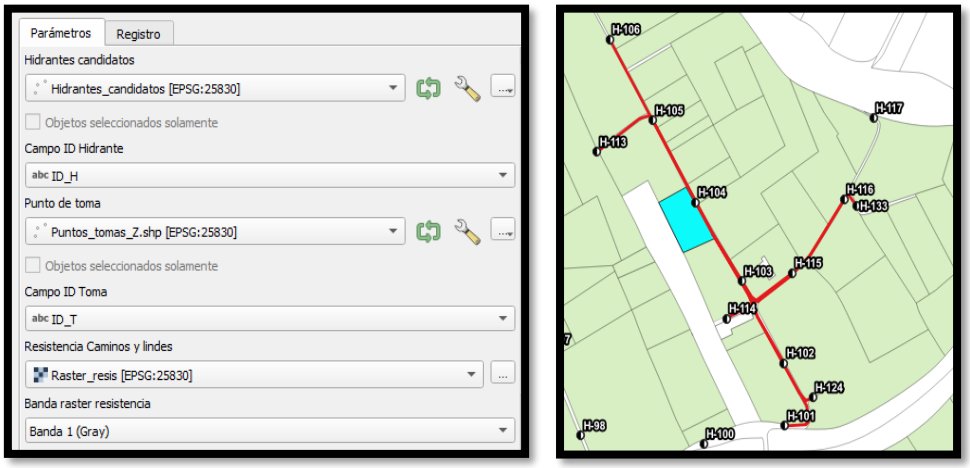
(a) (b)

*Figura 4**: Mapa de calor con hidrantes eliminados en rojo (a) e hidrantes definitivos en verde (b).***

Con esta técnica se consiguen eliminar, para los casos de estudio, desde un 12,50 % hasta un 44,26 % de los hidrantes iniciales. Como valor medio se descartarán un 24,42 %.

2.5. Programación del proceso de optimización.

En el entorno SIG es posible llevar a cabo procesos de programación mediante el lenguaje Python. En este caso, se programa un flujo de trabajo para el trazado de tomas a parcela por las vías y caminos seleccionados, y un proceso de cálculo para el dimensionado de las tomas a parcela que van a formar parte del proceso de optimización. Tras la programación se obtiene la siguiente interfaz que permite interactuar con las capas del proceso para obtener los resultados de las tomas a parcela candidatas y el resultado de la capa de líneas con las tomas a parcela calculadas.



(a) (b)

***Figura 5**: Interfaz del programa en QGIS (a) y trazado automático de las tomas a parcela (b).*

Con las tomas a parcela trazadas y calculadas y los hidrantes multiusuario candidatos en la interfaz de GIS, es el momento de obtener el modelo de optimización. Para ello, se utiliza el algoritmo metaheurístico GRASP y se parte desde una solución inicial donde cada toma a parcela se asigna al hidrante más cercano. Desde ese punto, el algoritmo va reasignando tomas a hidrantes más lejanos con el objetivo de reducir el número de hidrantes, aumentando la longitud y diámetros de las tomas, y valorando si se compensan los costes. Gráficamente se puede ver el proceso de optimización en GIS (Figura 6).

La fase de optimización lleva como datos de partida la solución inicial (S1). En este punto se trata de reasignar parcelas de hidrantes con un número bajo de tomas a aquellos que aún son capaces de abastecer más de las que contienen. Esta fase de mejora se realiza hasta que la solución no mejore en cuanto a la función objetivo se refiere.

Esta reasignación llevará a la función objetivo a aumentar el coste derivado de la toma (pues aumentará su longitud y posiblemente su diámetro) pero se permite concentrar más las tomas, disminuyendo el coste de instalación del hidrante multiusuario, ya que se elimina uno de ellos por completo. También es cierto que al aumentar el caudal demandado por un hidrante con más parcelas aumenta también el coste de algunos de sus elementos, pero no de todos ellos, por lo que al final se consigue una mejora del resultado global en cada iteración. En los siguientes puntos se describe cada una de las iteraciones llevadas a cabo.

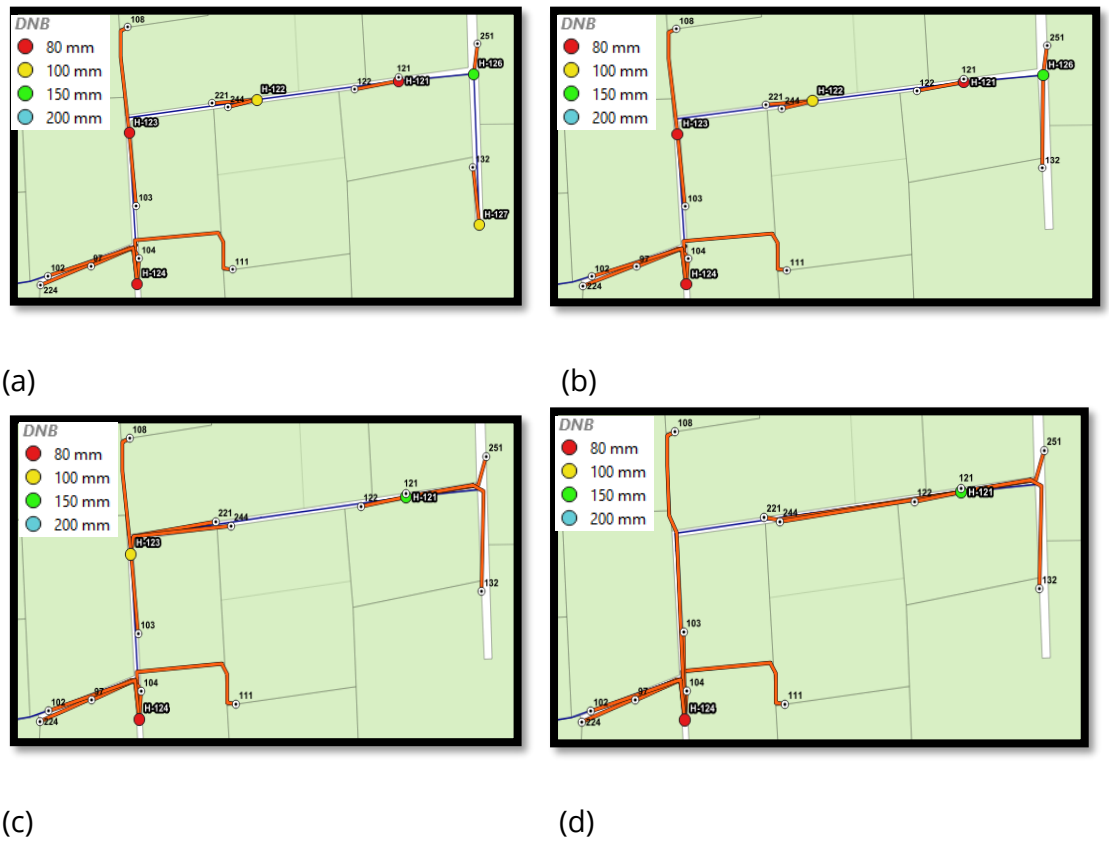


***Figura 6**: Solución inicial de tomas e hidrantes (a), primera iteración (b), segunda iteración (c) y tercera iteración (d).*

En la solución dos (b) se trata de reducir el coste global de la red terciaria dejando todos los hidrantes con un mínimo de dos tomas. Con ello se consigue, en la medida de lo posible, que todos los hidrantes con una toma desaparezcan y estas sean reasignadas al siguiente hidrante candidato que supone un menor coste.

En las siguientes figuras se muestra el proceso iterativo que sigue el método de optimización. Se parte de la solución inicial (S1) hasta llegar al final del proceso de optimización en las sucesivas iteraciones.

En la solución 2, el algoritmo elimina hidrantes con menos de 2 parcelas asignadas (H-126 y H-127), priorizando los más alejados y reasignando tomas para reducir costes. En la solución 3, busca que ningún hidrante tenga menos de 3 tomas, reasignando las de H-122 a H-123 y eliminando H-122. En la siguiente iteración, se evita que queden hidrantes con menos de 4 tomas, reasignando las de H-123 a H-121 y H-124, eliminando H-123. Así, H-121 y H-124 abastecen ahora a 6 y 7 tomas, respectivamente.

3. Resultados

En este punto se muestran los resultados obtenidos tras aplicar la metodología anterior al dimensionado de las redes objeto de estudio. En primer lugar, se muestra la evolución que sigue el coste de la red en función de las iteraciones que realiza el algoritmo. En la siguiente figura se puede ver la evolución, a modo de ejemplo, del caso Llíria_1.

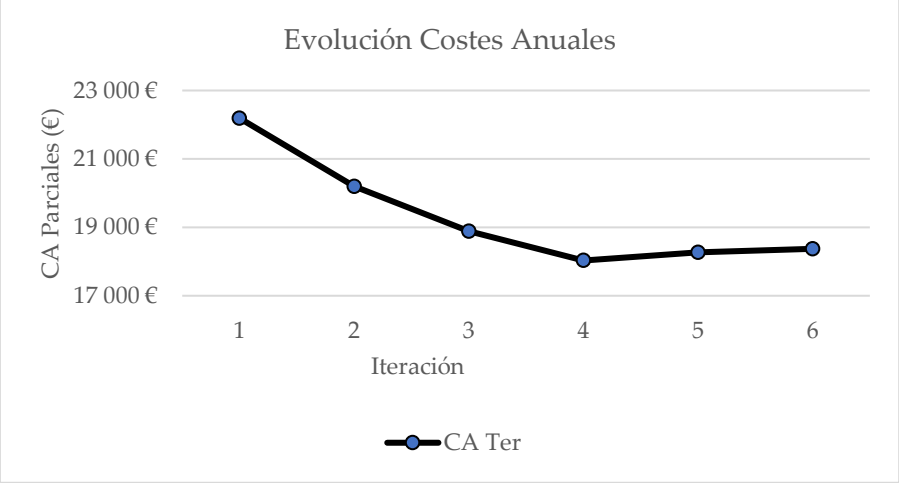


***Figura 7**: Evolución de los costes de amortización (CA) en el caso Llíria_1.*

Se puede ver cómo, en un inicio, el coste de amortización de la red (CA) es elevado, puesto que la red contiene gran cantidad de hidrantes multiusuario y tomas a parcelas de poca longitud y reducido diámetro. Tras la reasignación que va llevando a cabo el algoritmo se puede ver como el descenso del número de hidrantes reduce considerablemente el CA hasta llegar a un punto donde vuelve a aumentar. Este aumento se produce debido a que las tomas a parcela, al tener limitada la pérdida de carga, aumentan su diámetro y los costes de eliminar hidrantes ya no se compensan.

En conjunto, los valores de ahorro obtenidos para todos los casos de estudio oscilan entre el 5,62 % para el caso de Enguera_1 y el 32,00% para Picassent_3 siendo el valor medio 14,21 %. En la tabla siguiente se pueden ver todos los resultados.

Tabla 4: ***Porcentajes de ahorro.***

Caso de estudio	% ahorro
Enguera_1	8,93
Enguera_2	6,31
Llíria_1	15,69
Llíria_2	12,46

Caso de estudio	% ahorro
Palmeral_1	15,86
Palmeral_2	13,92
Picassent_1	11,16
Picassent_2	11,49
Picassent_3	22,32
Picassent_4	5,62
Sellent_1	14,79
Sellent_2	32,00

4. Conclusión

Como se aprecia en los resultados, la aplicación de la metodología planteada produce ahorros sobre el dimensionado de la red terciaria. Los resultados se comparan con redes existentes dimensionadas con métodos convencionales y en todos ellos se producen ahorros por lo que se puede validar la misma.

Por otro lado, la utilización de SIG para esta tipología de trabajos ayuda en el manejo de grandes paquetes de información, pues se trata de grandes superficies de regadío, además de que proporciona un resultado gráfico, fácil de interpretar, geolocalizado y medible, por lo que es idóneo a la hora de posteriormente valorar las unidades de obra necesarias en cada Proyecto o elaborar planimetrías con los resultados.

Además del ahorro económico que se ha obtenido, se aporta una posible metodología de trabajo que, de cara al diseño de redes de riego colectivas, contribuya a la homogenización de criterios y resultados eliminando del proceso de diseño factores intuitivos o la propia experiencia del proyectista. Esto permitirá un diseño global de todo el proceso de implantación de una red de riego.

Referencias

1. WWAP, The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, 2015.
2. A. Ramón Morte, Tecnificación del regadío valenciano : Análisis territorial de la difusión del sistema del regadío localizado. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1995.
3. E. Lopez-Gunn, P. Zorrilla, F. Prieto, and M. R. Llamas, “Lost in translation? Water efficiency in Spanish agriculture,” Agric. Water Manag., vol. 108, pp. 83–95, 2012.
4. L. Bonet, P. J. Ferrer, J. R. Castel, and D. S. Intrigliolo, “Soil capacitance sensors and stem dendrometers: useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards? - Dialnet,” Spanish J. Agric. Res., vol. 2, pp. 52–65, 2010.

5. F. González Villa and A. Garcia Prats, “Using Location-Allocation Algorithms to Distribute Multioutlet Hydrants in Irrigation Networks Design,” J. Irrig. Drain. Eng., vol. 138, no. 4, pp. 304–309, Aug. 2011.
6. M. Á. Jímenez-Bello, E. López-Pérez, J. Manzano-Juárez, C. V. Palau Estevan, Á. Royuela-Tomás, and D. S. Intrigliolo-Molina, “Assessing irrigation performance in a citrus irrigation district using geographic information systems and remote sensing data,” Ital. J. Agrometeorol., vol. 3, pp. 104–109, 2015.
7. I. Balbastre Peralta, “Análisis, caracterización y diseño de Hidrantes multiusuario para riego (Tesis doctoral),” Universitat Politècnica de València, 831 pp, 2016.
8. AEN/CTN68 UNE-EN 14267, “Técnicas de riego. Hidrantes para riego.,” 2005.
9. C. V. Palau, J. Arviza, I. Balbastre, and J. Manzano, “DIMSUB, a computer program for designing microirrigation subunits. Tool definition and case studies,” Sci. Agric., vol. 77, 2019.
10. J. Arviza Valverde, Riego localizado, Servicio d. 1996.
11. C. González-Cebollada and B. Macarulla, “Comparative analysis of design methods of pressurized irrigation networks,” Irrig. Drain., vol. 61, no. 1, pp. 1–9, 2012.
12. R. Earl, G. Thomas, and B. S. Blackmore, “The potential role of GIS in autonomous field operations,” Comput. Electron. Agric., vol. 25, no. 1–2, pp. 107–120, Jan. 2000.
13. A. Sharma, M. Kumar, and N. Hasteer, Applications of GIS in Management of Water Resources to Attain Zero Hunger, vol. 39. Springer, 2020.
14. D. Djokic and D. R. Maidment, “Application of GIS Network Routines for Water Flow and Transport,” J. Water Resour. Plan. Manag., vol. 119, no. 2, pp. 229–245, Mar. 1993.
15. J. Bosque Sendra, Sistemas de información geográfica, 2ª ed. cor. Madrid: Rialp, 1997.

Cultivo de pimenta em sistemas sem solo: uso de fertirrigação e fertilizantes de liberação controlada

Claudinei Souza[1,*], Viviane Nascimento[2], Lino Sitoe[2] e Roselena Faez[1]

1 Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, SP, Brasil; cfsouza@ufscar.br e faez@ufscar.br

2 Programa de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente/UFSCar; vivianenascimento@estudante.ufscar.br e linocs@estudante.ufscar.br

* Autor Correspondente: cfsouza@ufscar.br

Resumo: O cultivo de pimenta Maria Bonita (*Capsicum chinense*) é relevante para a agricultura global, e práticas agrícolas sustentáveis são fundamentais. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da fertirrigação em comparação com o uso de fertilizantes de liberação controlada (FLC) no cultivo sem solo. O experimento foi conduzido na estufa agrícola do CCA/UFSCar, Araras-SP, Brasil, utilizando substrato de fibra de coco. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com três tratamentos: fertirrigação (FERT), aplicação de FLC no plantio (PAT) e aplicação de FLC em duas etapas (PAD), sendo a primeira no transplantio da muda e a segunda 45 dias após o plantio. Foram realizadas 12 repetições, totalizando 36 parcelas experimentais. Os parâmetros avaliados incluíram qualidade (ºBrix) e produção (número, comprimento, diâmetro e massa dos frutos). A análise de variância (ANOVA) não mostrou diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis analisadas (valor-P > 0,05), indicando que os tratamentos não influenciaram de maneira estatisticamente significativa. Isso sugere que os FLC podem substituir a fertirrigação, oferecendo uma alternativa eficiente e sustentável, com potencial para reduzir custos operacionais e impactos ambientais, sem comprometer a produtividade e qualidade dos frutos, contribuindo para a otimização dos recursos e sustentabilidade da produção.

Palavras-chave: Cultivo sem solo; *Capsicum chinense*; Fertiliberadores; Agricultura sustentável

1. Introdução

Em 2022, a população mundial alcançou 8 bilhões de pessoas, com projeções de crescimento para 8,5 bilhões em 2030 e 9,7 bilhões em 2050 [1]. Estima-se que 29,5% da população global enfrente algum nível de insegurança alimentar [2], e a produção de alimentos precisará aumentar cerca de 60% para atender à demanda futura [3]. Esse cenário impõe desafios significativos para o cumprimento do ODS 2 da Agenda 2030, que visa erradicar a fome, garantir a segurança alimentar e promover uma agricultura sustentável.

De acordo com dados da [4], a produção global de *Capsicum* atingiu cerca de 29,93 milhões de toneladas anuais, com uma produtividade média de 15,77 toneladas por hectare. No Brasil, o cultivo de pimentas é de grande relevância econômica e social, com uma produção anual de 280.000 toneladas em 13.000 hectares, sendo São Paulo o segundo maior produtor [5]. Entre as espécies de *Capsicum*, destaca-se a *Capsicum chinense*, que apresenta grande diversidade genética na Bacia Amazônica e é amplamente cultivada em regiões tropicais [6]. A pimenta Biquinho, pertencente a essa espécie, tem crescente demanda no mercado nacional e internacional, sendo processada em geleias, pastas e conservas [7].

O principal nutriente aplicado no cultivo de pimentas é o potássio, seguido por cálcio e nitrogênio [8]. O manejo eficiente dos nutrientes é fundamental para maximizar a produtividade e a qualidade dos frutos, uma vez que os principais nutrientes exigidos pelas plantas são potássio e nitrogênio, seguidos de fósforo, cálcio e magnésio [9].

O Brasil é o quarto maior consumidor mundial de fertilizantes, consumindo aproximadamente 8% dos fertilizantes utilizados globalmente. No entanto, estima-se que cerca de 40% desses insumos sejam desperdiçados devido à falta de tecnologias mais avançadas na produção e aplicação [8]. O uso ineficiente de fertilizantes contribui significativamente para impactos ambientais negativos, como a contaminação de solo e água, a eutrofização de ecossistemas aquáticos e o aumento das emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e óxido nitroso, que agravam as mudanças climáticas [10].

Diante desse cenário, é crucial desenvolver soluções que minimizem os impactos ambientais e promovam o uso sustentável dos recursos naturais. Nesse contexto, o emprego de Fertilizantes de Liberação Controlada (FLC), aliado à técnica de cultivo sem solo, surge como uma alternativa promissora para aumentar a eficiência no uso de nutrientes, melhorar o rendimento das culturas e reduzir a frequência de aplicações, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura [11].

A hipótese deste estudo é que o uso de FLC no cultivo sem solo da cultivar Maria Bonita da pimenta biquinho pode melhorar a eficiência nutricional e a qualidade dos frutos, além de reduzir os impactos ambientais associados ao uso de fertilizantes convencionais. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é avaliar as características agronômicas e físico-químicas dessa cultivar, comparando as técnicas de fertirrigação e FLC, com a finalidade de contribuir para a sustentabilidade e otimização da produção de pimentas, tanto no Brasil quanto no cenário global.

2. Material e Métodos

Local e condições experimentais

O cultivo da cultivar Maria Bonita da pimenta Biquinho (*Capsicum chinense*) foi realizado na estufa agrícola do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental (DRNPA), no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus Araras – SP, Brasil (latitude 22°18'49,72'' S e longitude 47°23'3,23'' O) (Figura 1).

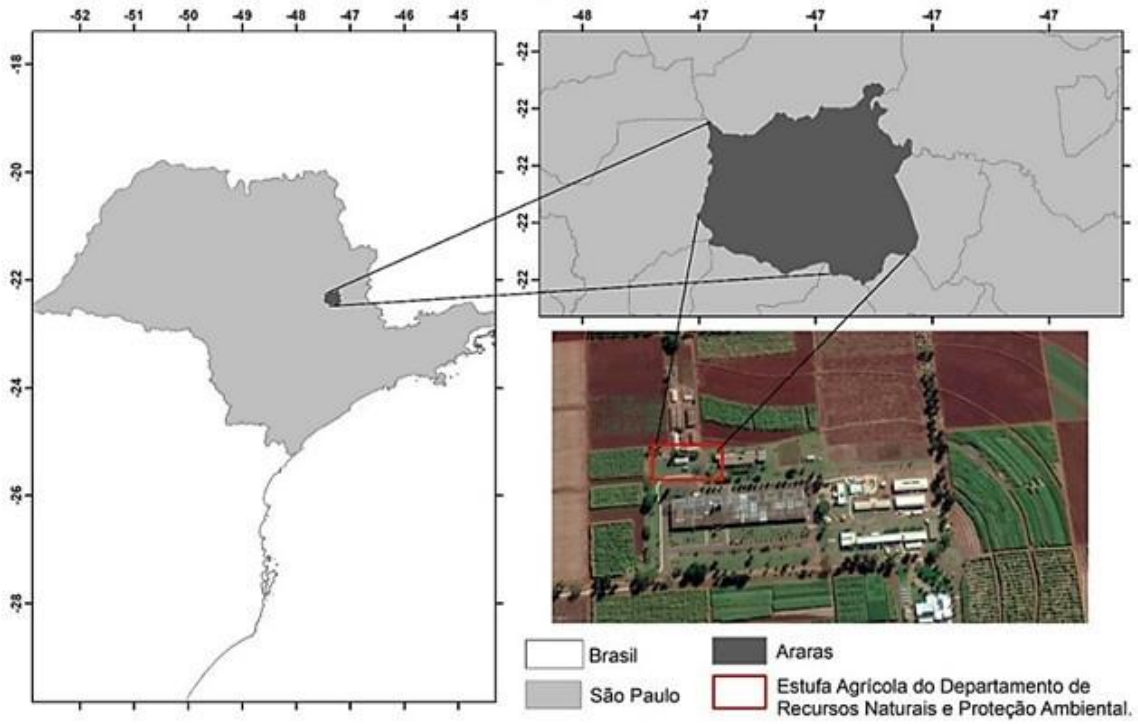


Figura 1. Localização e características da área de estudo.

A estufa possui estrutura em aço galvanizado com dimensões de 6,4 m de largura, 18,0 m de comprimento e pé-direito de 3,0 m. As laterais são fechadas com tela do tipo sombrite e o teto é em polietileno transparente. O sistema de cultivo utilizado foi o cultivo sem solo, com substrato de fibra de coco e irrigação por gotejamento, (Figura 2). O solo da estufa foi coberto com plástico ráfia para evitar o crescimento de plantas daninhas, e o sistema de irrigação por gotejamento garantiu a aplicação precisa de água e nutrientes.

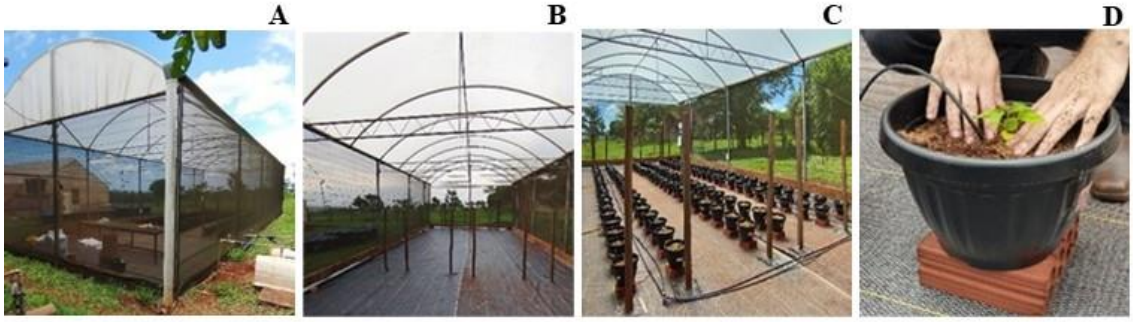


Figura 2. Esquema visual do preparo do local para o cultivo da pimenta Maria Bonita. (A) Estufa agrícola destinada à implementação do cultivo; (B) Instalação do plástico ráfia e do sistema de tutoramento; (C) Disposição dos vasos conforme o delineamento experimental; (D) Plantio das mudas de pimenta nos vasos.

A cultivar Maria Bonita da pimenta biquinho foi cultivada em vasos de 8 L contendo fibra de coco (Amafibra®) como substrato inerte (pH 6,2 ± 0,3; Condutividade elétrica 0,7 ± 0,6 dS m-1; Densidade 150 kg m-³). O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com três tratamentos e 12 repetições por tratamento. Cada repetição foi composta por quatro vasos, totalizando 48 vasos por tratamento e 144 vasos no total. O experimento foi conduzido em uma área de 6,4 m de largura por 12,65 m de comprimento, organizada em três fileiras duplas de plantas, divididas em 12 blocos (Figura 3). O espaçamento entre plantas foi de 0,45 m, entre fileiras simples 0,60 m e entre fileiras duplas 1,15 m. O transplante das mudas ocorreu quando as plantas apresentavam, em média, 10 folhas definitivas e 15 cm de altura, aproximadamente 50 a 60 dias após a semeadura.

Os tratamentos avaliados foram: (1) aplicação de fertilizantes convencionais via água de irrigação (FERT); (2) adição total de fertilizante de liberação controlada (FLC) ao substrato no transplantio (PAT); e (3) aplicação fracionada de FLC em duas etapas (PAD), sendo a primeira no transplantio e a segunda após 45 dias, utilizando o método convencional de distribuição em meia-lua. As doses de fertilizantes aplicadas foram baseadas nas recomendações de [12] para a cultura da alface, devido à ausência de recomendações específicas para a cultivar Maria Bonita da pimenta biquinho.

Os FLC utilizados neste experimento foram o nitrato de potássio e o fosfato monoamônio (MAP), ambos da linha Multicote, fabricados pela Haifa Fertilizantes. Esses FLC foram aplicados diretamente ao substrato e os fertilizantes adicionais (nitrato de cálcio, sulfato de magnésio e ConMicros) para completar a recomendação de [12] foram disponibilizados via fertirrigação por gotejamento.

Para os tratamentos PAD e PAT, foi utilizado um reservatório de 350 L contendo a solução nutritiva adicional e para o tratamento FERT, também, foi utilizado um

reservatório de 350 L exclusivo, contendo uma solução nutritiva completa para atender a recomendação, sendo composta por água e os cinco fertilizantes solúveis (nitrato de cálcio, sulfato de magnésio, ConMicros, nitrato de potássio e MAP).

A fertirrigação foi realizada por meio de gotejamento, utilizando tubos gotejadores com emissores autocompensantes, espaçados a 0,25 m, com vazão de 3,5 L h^{-1} e pressão de serviço entre 50 e 350 kPa. Os gotejadores eram da marca NaanDanJain, modelo NaanPC. Cada tratamento contou com uma linha de irrigação independente, sendo o painel controlador compartilhado entre as linhas. No painel de controle, foi instalado um controlador digital Wi-Fi (Figura 4A).

Para o monitoramento do consumo de água, foram instaladas sondas de capacitância, modelo Teros 12 – METER, com hastes de 0,055 m, para avaliar a umidade e a condutividade elétrica do substrato (Figura 4B). O manejo do sistema de irrigação foi realizado com base no monitoramento diário das sondas de capacitância, mantendo a umidade do substrato de fibra na capacidade de campo, com valor de 0,26 $m^3\ m^{-3}$.

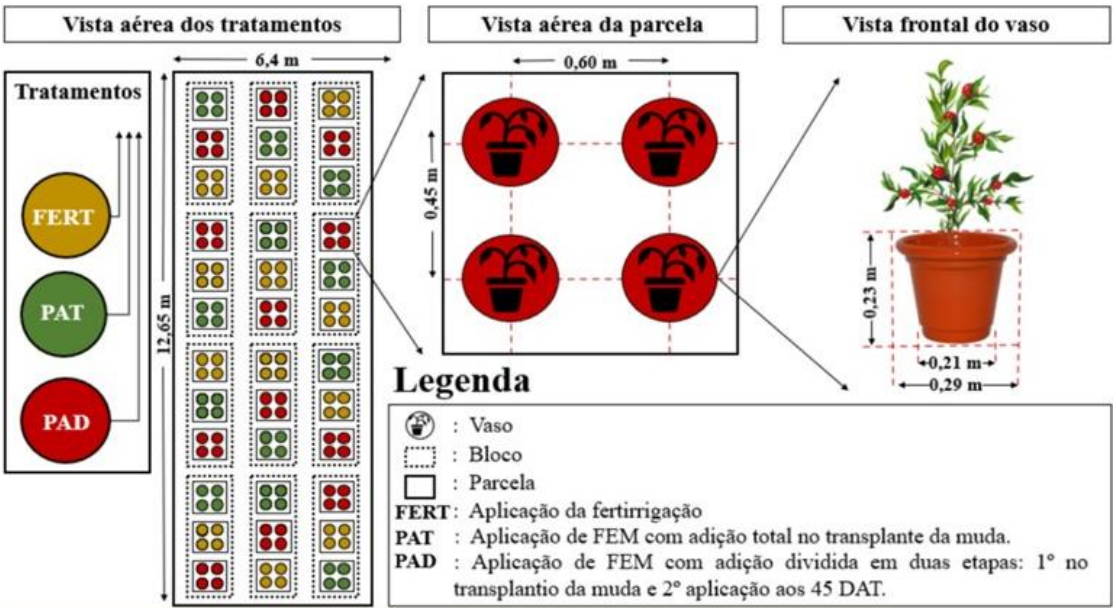


Figura 3. Ilustração do sistema de cultivo sem solo da pimenta Maria Bonita.

Figura 4. Componentes da irrigação e monitoramento do experimento: (A) controlador Wi-Fi. (B) Sensor de umidade e condutividade elétrica do solo.

Avaliações da qualidade e da produção das pimentas

Os frutos utilizados nas avaliações foram colhidos de quatro plantas por repetição em cada bloco dos tratamentos, quando atingiram o estádio de maturação completa (com coloração vermelha uniforme). As colheitas foram realizadas a cada 10 dias, entre 60 e 90 dias após o transplante (DAT), totalizando quatro coletas.

O teor de sólidos solúveis foi quantificado utilizando um refratômetro digital (KÜSS, DR 201–95) e expresso em °Brix, conforme a metodologia da [13]. Esse parâmetro foi determinado para cada amostra de fruto, com três réplicas por análise, fornecendo uma medida da concentração de açúcares presentes nos frutos maduros. A produção dos frutos foi registrada durante as coletas, incluindo a média de frutos por planta, a massa total de frutos por planta (g planta^{-1}), e as médias dos comprimentos (cm) e diâmetros (cm) dos frutos.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o software R [14], com nível de significância de 5%.

3. Resultados e Discussões

Após as colheitas, os frutos foram encaminhados ao laboratório para a realização dos procedimentos de avaliação da qualidade e produção das pimentas, conforme ilustrado na Figura 5.

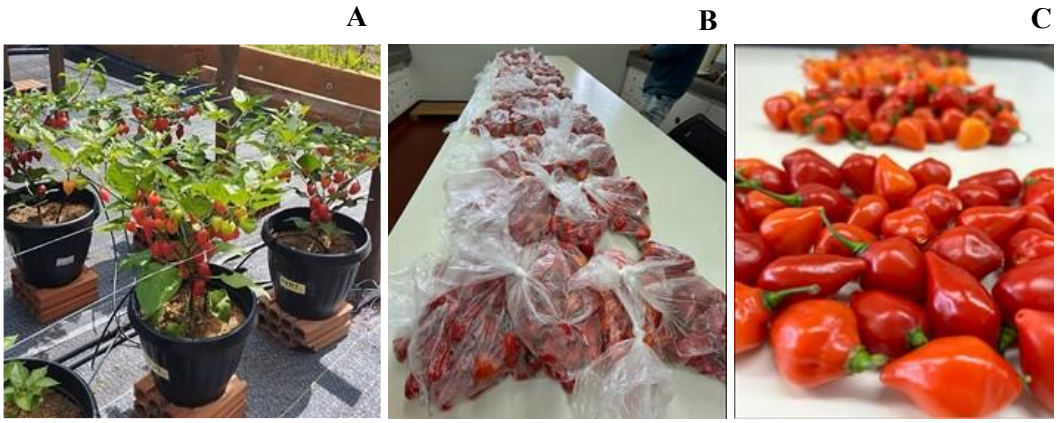


Figura 5. (A) Colheita dos frutos da pimenta Maria bonita; (B e C) Avaliação da qualidade e produção dos frutos da pimenta Maria Bonita.

3.1 Qualidade das pimentas

A análise dos resultados da ANOVA para o parâmetro oBrix não revelou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos FERT, PAD e PAT, com um valor-p de 0,1315, que é superior ao nível de significância adotado de 5% (valor crítico de F = 3,28), Tabela 1. Isso indica que, apesar das variações nos valores de oBrix observadas entre os tratamentos, as diferenças não são suficientes para que se considere que os tratamentos influenciaram de forma significativa a qualidade dos açúcares nos frutos de pimenta Maria Bonita. Esses resultados estão de acordo com a literatura, que indica que pequenas variações no teor de sólidos solúveis podem não refletir mudanças substanciais em termos práticos quando comparados com a variação natural de outros fatores ambientais e genéticos [15].

Tabela 1. Teste de Tukey a 5 % entre as médias do parâmetro qualitativo dos frutos de pimenta.

Tratamentos	Média de sólidos solúveis (ºBrix)
FERT	4,80 a
PAD	4,94 a
PAT	4,50 a
Valor-p	0,1315

Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre as médias pelo teste de Tukey a 5%.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que os FLC liberam nutrientes de maneira mais gradual ao longo do tempo, se aproximando da marcha de absorção das plantas, proporcionando uma nutrição contínua e equilibrada [16,17,18], o que pode não resultar imediatamente em um aumento significativo no conteúdo de açúcares. No entanto, em condições em que o controle de nutrientes é deficitário, como em solos pobres em nutrientes ou sujeitos a secas, os FLC podem mostrar benefícios em outras características das plantas, como o desenvolvimento

radicular ou a resistência a pragas e doenças devido a nutrição equilibrada contínua [19]. Em resumo, embora os tratamentos PAD e PAT tenham mostrado um pequeno aumento no valor de oBrix em relação ao FERT, a ausência de diferenças significativas indica que a utilização de FLC, em comparação com a fertirrigação, não trouxe melhorias substanciais na qualidade dos frutos no que diz respeito à concentração de sólidos solúveis.

3.2. Produção das pimentas

A análise dos parâmetros agronômicos da produção de pimenta Maria Bonita, incluindo a largura, comprimento, número de frutos e produção total (Tabela 2), revelou resultados interessantes sobre a influência dos diferentes tratamentos de fertilização.

Tabela 2. Teste de Tukey a 5 % entre as médias do parâmetro quantitativos dos frutos de pimenta.

Tratamentos	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Número (frutos/planta)	Produção (g/planta)
FERT	1,92 a	3,12 a	57 a	149,82 a
PAD	1,95 a	3,18 a	55 a	148,95 a
PAT	2,08 a	3,41 a	56 a	163,47 a
valor-p	0,0581	0,1204	0,9628	0,7034

Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre as médias pelo teste de Tukey a 5%.

Em relação à largura dos frutos, observou-se que o tratamento PAT (adição total de fertilizante de liberação controlada no transplantio) apresentou a maior média (2,08 cm), seguido por PAD (aplicação fracionada de FLC) e FERT (fertilização via água de irrigação), que apresentaram valores de 1,95 cm e 1,92 cm, respectivamente. A diferença entre os tratamentos foi pequena, não indicando uma diferença estatisticamente significativa (valor-p = 0,058), embora o valor de F (3,10) estivesse ligeiramente abaixo do valor crítico (3,28), o que sugere que, embora o PAT tenha promovido maior largura dos frutos, a diferença pode não ser suficientemente forte para conclusões definitivas em um nível de significância de 5%.

Quanto ao comprimento dos frutos, o tratamento PAT também se destacou, com uma média de 3,41 cm, seguido por PAD (3,18 cm) e FERT (3,12 cm). Contudo, o teste Tukey a 5% não indicou diferenças significativas entre os tratamentos para essa

variável (valor-p = 0,12), o que sugere que os diferentes métodos de fertilização não influenciaram significativamente o comprimento dos frutos. As pequenas variações observadas podem ser atribuídas à variabilidade natural entre as plantas, já que as diferenças não foram substanciais o suficiente para provocar uma mudança significativa no comprimento dos frutos.

No parâmetro de número de frutos por planta, os três tratamentos apresentaram valores semelhantes, com FERT (57 frutos), PAD (55 frutos) e PAT (56 frutos). O teste estatístico indicou que não houve diferença significativa (valor-p = 0,96), sugerindo que os métodos de fertilização testados não afetaram o número de frutos produzidos por planta. Esse resultado pode indicar que a quantidade de frutos não é sensível às diferenças nos regimes de fertilização empregados, possivelmente devido à saturação do potencial de frutificação da planta ou ao equilíbrio já alcançado com os diferentes fertilizantes.

Por fim, em relação à produção de frutos por planta, o tratamento PAT foi o que gerou a maior média de produção (163,47 g), seguido por FERT (149,82 g) e PAD (148,95 g), embora o teste Tukey a 5% tenha indicado que as diferenças entre os tratamentos não foram significativas (valor-p = 0,70). Este resultado sugere que a aplicação de fertilizantes de liberação controlada, independentemente do método (única ou fracionada), não apresentou um impacto substancial na produção total de frutos, o qual reforça de que o FLC distribuiu uniformemente o fertilizante ao longo do ciclo da planta analisado oferecendo uma nutrição constante e balanceada. [20] compararam o crescimento de plantas de alface adubadas com polímeros de liberação controlada e adubação convencional, e não encontraram diferenças estatísticas na massa vegetal. Além disso, [21], ao estudarem o efeito do uso de FLC em tomate-cereja, observaram que não houve diferença na produção de frutos quando comparado ao método de aplicação de nutrientes via água de irrigação. Esses resultados corroboram os achados deste estudo, uma vez que as análises de qualidade e produção das pimentas também não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos.

De maneira geral, os resultados indicam que os tratamentos de fertilização aplicados (fertirrigação ou liberação controlada) não influenciaram de maneira consistente a maioria dos parâmetros analisados, como número e produção de frutos por planta. No entanto, para alguns parâmetros como a largura dos frutos, o tratamento com adição total de fertilizantes de liberação controlada (PAT) mostrou um desempenho ligeiramente superior, embora os efeitos não tenham sido suficientemente robustos para uma conclusão definitiva em termos estatísticos. Esses resultados podem sugerir que o manejo de fertilizantes, embora importante, pode ter um impacto mais variável dependendo do parâmetro estudado e da

interação com as condições ambientais e de cultivo, também, indicam que os FLC podem ser uma alternativa viável e sustentável à fertirrigação, sem comprometer a produtividade e qualidade dos frutos.

4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a aplicação de FLC no cultivo sem solo da pimenta Maria Bonita apresentou efeitos variados nas características agronômicas e físico-químicas dos frutos, sem diferenças significativas em comparação com a fertirrigação. No entanto, os FLC mostraram potencial para promover uma distribuição mais eficiente dos nutrientes, o que pode contribuir para a sustentabilidade da produção. Assim, os FLC podem ser uma alternativa viável e sustentável à fertirrigação, sem comprometer a produtividade e qualidade dos frutos.

5. Referências

1. UNDESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division). World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Technical Report, United Nations: New York, 2017.
2. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. FAO: Rome, 2023. https://doi.org/10.4060/cc3017en
3. Alexandratos, N.; Bruinsma, J. World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision. FAO: Rome, 2012. (ESA Working Paper No. 12-03).
4. FAO. Food and Agriculture Organization, 2014. Disponível online: http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor (acessado em 20 novembro 2024).
5. Pinto, C. M. F.; Pinto, C. L. O.; Araújo, R. F.; Donzeles, S. M. L. Good agricultural and manufacturing practices: importance for the sustainability of the *Capsicum pepper* production chain. In: Sales, F. O. Exact and Earth Sciences: Exploration and Qualification of Different Technologies, v. 3; Atena: Paraná, 2021; pp. 68–93.
6. Heinrich, A. G.; Ferraz, R. M.; Ragassi, C. F.; Reifschneider, F. J. B. Characterization and evaluation of self-fertilized progenies of biquinho salmon pepper. Brazilian Horticulture 2015, 33, 465–470. https://doi.org/10.1590/S0102-053620150000400010
7. Gratão, P. Família que plantava pimentas no quintal de casa hoje exporta para 11 países. Pequenas Empresas & Grandes Negócios, 2020. Disponível online: https://revistapegn.globo.com/Empreendedorismo/noticia/2020/07/familia-que-plantava-pimentas-no-quintal-de-casa-hoje-exporta-para-11-paises.html (acessado em 22 novembro 2024).
8. Brasil. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050): uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. SAE: Brasília, 2021. 195 p. Disponível online: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos (acessado em 02 dezembro 2024).
9. Veloso, C. A. C.; Carvalho, E. J. Absorption and extraction of some nutrients by the 'guajarina' black pepper cultivar. Agricultural Science 1999, 56, 443–447. https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000200026
10. Jariwala, H.; Santos, R. M.; Lauzon, J. D.; Dutta, A.; Wai Chiang, Y. Controlled-release fertilizers (CRFs) for climate-smart agricultural practices. Environmental Science and Pollution Research 2022, 29, 53967–53995. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20890-y

11. Machado, T. O.; Grabow, J.; Sayer, C.; de Araújo, P. H.; Ehrenhard, M. L.; Wurm, F. R. Biopolymer-based nanocarriers for sustained release of agrochemicals: A review on materials and social science perspectives for a sustainable future of agriculture and horticulture. Advances in Colloid and Interface Science 2022, 303, 102645. https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102645
12. Furlani, P. R.; Silveira, L. C.; Bolonhezi, D.; Faquin, V. Estruturas para o cultivo hidropônico. In: Cultivo Protegido de Hortaliças em Solo e Hidroponia, v. 20; EPAMIG: Belo Horizonte, 1999; pp. 72–80 (Informe Agropecuário). Disponível online: https://livrariaepamig.com.br/wp-content/uploads/2023/03/IA-200-201.pdf (acessado em 02 dezembro 2024).
13. AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Analytical Chemists., 18th ed.; AOAC: Gaithersburg, 2016.
14. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2021. Disponível online: https://www.R-project.org/.
15. Resende, J. T. V. de; Morales, R. G. F.; Faria, M. V.; Rissini, A. L. L.; Camargo, L. K.; Camargo, C. K. Produtividade e teor de sólidos solúveis de frutos de cultivares de morangueiro em ambiente protegido. Horticultura Brasileira 2010, 28 (2), 185–189. https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000200008
16. Leal, A. J. F.; Valderrama, M.; Kaneko, F. H.; Leal, U. A. S. Produtividade da soja de acordo com diferentes doses de cloreto de potássio revestido ou não com polímeros. Glob. Sci. Technol. 2015, 8 (1), 19–30. https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v8n1p19-30
17. Messa, L.; Froes, J. D.; Souza, C. F.; Faez, R. Híbridos de quitosana-argila para encapsulamento e liberação sustentada do fertilizante nitrato de potássio. Química Nova (Impresso) 2016, 39, 1215–1220. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160133
18. Cunha, F. L.; Nieri, E. M.; Santos, J. A.; Almeida, R. S.; Melo, L. A.; Venturin, N. Uso dos adubos de liberação lenta no setor florestal. Pesquisa Florestal Brasileira 2021, 41. https://doi.org/10.4336/2021.pfb.41e201902063
19. Marschner, H. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press Inc.: London, 1986. 674 p.
20. Souza, C. F.; Faez, R.; Bacalhau, F. B.; Bacarin, M. F.; Pereira, T. S. In situ monitoring of a controlled release of fertilizers in lettuce crop. Eng. Agric. 2017, 37 (4), 656–664. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p656-664/2017
21. Souza, C. F.; Sala, F. C.; Faez, R. Polymer fertilizer and the fertigation of grape tomatoes in protected cultivation. Scientia Horticulturae 2023, 311, 111801. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111801

Efecto del acolchado sobre algunos parámetros del suelo y la producción de lechugas bajo riego por goteo

Eugenia Esperanza León [1], Iván Rolando Belesaca [1] and Ángel Javier Aguirre [2,*]

[1] Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Ecuador; eugenialeon_04@hotmail.com; ivan.belesaca@ucuenca.edu.ec

[2] Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza; Proyecto PROMETEO, Ministerio de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación. Quito, Ecuador

* Correspondence: jaguirre@unizar.es;

Abstract: El agua dulce es un recurso renovable pero limitado, por lo que su uso eficiente es clave para la sostenibilidad agrícola. El riego por goteo combinado con acolchado puede mejorar la conservación del agua en cultivos como la lechuga (*Lactuca sativa*). Se realizó un experimento en la Granja El Romeral, Cantón Guachapala (Ecuador), a 2254 m s.n.m., con clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo y Húmedo y suelo de textura franca. El ensayo se diseñó con bloques al azar, tres repeticiones y cuatro tratamientos de acolchado: cascarilla de arroz, acículas de pino, polietileno y control (sin cobertura). La temperatura del suelo no mostró diferencias entre tratamientos, pero la densidad aparente fue mayor con acículas de pino y polietileno. El pH y la conductividad eléctrica del suelo no fueron diferentes bajo los distintos acolchados. En cuanto a la producción, no hubo diferencias significativas en número ni peso por unidad de superficie, ni diámetro del tallo, aunque las lechugas con acículas de pino fueron más pesadas y bajo polietileno el diámetro de los cogollos fue mayor. Se concluye que el acolchado con acículas de pino y polietileno aumentan la densidad aparente sin afectar negativamente el cultivo de lechuga, representando una alternativa sostenible para su manejo con riego.

Keywords: acículas pino; cascarilla arroz; polietileno; densidad aparente; diámetro cogollo;

1. Introducción

La escasez de agua es un desafío global que requiere estrategias de conservación eficientes, especialmente en la agricultura, que representa aproximadamente el 80% del consumo de agua dulce a nivel mundial [1]. En Ecuador, la disponibilidad de agua fluctúa significativamente entre las estaciones lluviosa y seca, con una precipitación media anual de 2274 mm [2]. Sin embargo, las ineficiencias en el riego provocan pérdidas sustanciales de agua, lo que resulta en una eficiencia general de solo el 15-25% [3, 4]. La disponibilidad limitada de agua y los altos costos de riego

dificultan la productividad de los cultivos [5], ya que el déficit de humedad en el suelo afecta negativamente la división celular, el crecimiento de las plantas y el rendimiento al reducir la transpiración y la fotosíntesis [6-8].

Una estrategia prometedora para optimizar el uso del agua en la agricultura es la aplicación de acolchado, que puede ser sintético (por ejemplo, plástico) u orgánico [9, 10]. Se ha demostrado que el uso del acolchado mejora la retención de humedad del suelo, reduce la evaporación y el crecimiento de plantas adventicias, y mejora la estructura del suelo [10, 11]. Dependiendo del tipo y la aplicación, los acolchados orgánicos pueden aumentar significativamente las tasas de infiltración y reducir la compactación del suelo [12-14].

Sobre esta base, este estudio analiza los efectos de tres tipos de acolchado: cascarilla de arroz, acículas de pino y polietileno negro, en un cultivo de lechuga (Lactuca sativa) regado por goteo, en la temperatura, pH, conductividad eléctrica y densidad aparente del suelo, y en el peso, diámetro de cogollo y tallo de cada lechuga, así como sobre la producción: número de planas y peso de plantas por ha cultivada.

2. Material y métodos

2.1. Zona de estudio

El ensayo se realizó, en la Granja El Romeral, perteneciente a la Universidad de Cuenca, ubicada en la Provincia del Azuay, Cantón Guachapala, a 45 km. de la ciudad de Cuenca, entre la Quebrada *Shuscurrun* y el cauce del Río Paute; coordenadas S 2°45’54”, W 78°42’58”, a 2254 m. snm.

El clima predominante de la zona es el Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo y Húmedo [15]; las temperaturas medias anuales están entre los 12 y 20 °C, con unas temperaturas máxima de hasta 30 °C y mínima a veces bajo 0 °C; la precipitación anual fluctúa entre los 500 mm y los 2.000 mm; la humedad relativa entre el 65% y el 85%; recibe ocasionalmente abundantes lluvias durante el invierno (enero - mayo) y la duración de la insolación está comprendida entre las 1.000 y 2.000 horas anuales.

Antes del ensayo se midieron: (1) la textura del suelo mediante el método del hidrómetro [16]: Franca; (2) conductividad hidráulica mediante el método del pozo invertido [17]: 7.52 mm/hora; (3) la densidad aparente en el laboratorio de la Facultad [18]: 1.22 gr./cm3 (se mediría también tras la cosecha); (4) la curva de retención de humedad en el suelo [19] ofreció como punto de saturación el 50.51%, como capacidad de campo el 39.96% y como punto de marchitez el 26.13%; (5) la

profundidad efectiva fue de 0.20 m; (6) factor de agotamiento del agua en el suelo (p) se calculó, de acuerdo a las recomendaciones de la FAO [20] de modo que resultó de 0.30; (7) el pH y la conductividad eléctrica (dS/m) del suelo se midió mediante el método potenciométrico [21, 22]; y (8) debido a que las coberturas orgánicas moderan las fluctuaciones de temperatura del suelo, incrementando su temperatura y controlando las variaciones estacionales [14], la temperatura del suelo se midió con el MPS-6 Dielectric Water Potential Sensor (Decagon Devices, Inc.; Pullman, WA, USA), instalando uno por unidad experimental, a 10 cm de profundidad, durante todo el ensayo, conectados a un datalogger alimentado por energía solar.

2.2. Manejo del acolchado y el cultivo de lechuga

Los datos de temperatura y precipitación ambiental se obtuvieron de la estación meteorológica de la Granja; modificando el valor de la precipitación mediante el método del Soil Conservation Service [23]. Como coeficientes del cultivo (Kc) se estimaron los siguientes: inicial = 0.7, desarrollo = variable, medio = 1.05, y final = 0.95 [20]. El Kc inicial comprende desde el trasplante (finalizando la fase de plántula) hasta iniciar la fase de roseta, de acuerdo a las condiciones ambientales del cultivo su duración fue de 20 a 25 días. El Kc de desarrollo corresponde a la fase de roseta su duración fue de 18 a 22 días. El Kc medio corresponde a la fase de formación de cabeza hasta la floración, pero en este trabajo se consideró solamente hasta la terminación de la formación de la cabeza, por lo tanto, su duración fue de 12 a 18 días.

La determinación de la humedad del suelo se realizó mediante el uso de un reflectómetro de dominio de tiempo (Time Domain Reflectometry, TDR) introducido en los primeros 12 cm del suelo. Se estimó el contenido de agua sobre la base de la constante dieléctrica (Ka) utilizando una ecuación polinomial. Para ello fue necesario realizar graduaciones in situ, calibrándolo en el laboratorio y luego en el campo de ensayo, con el objeto de obtener funciones individuales de calibración para cada tipo de suelo. La calibración de la sonda TDR se realizó comparando las lecturas con muestras de suelo a profundidad de 0-20 cm, recolectadas en cilindros metálicos, enrazados y pesados. Esas muestras se calentaron en la estufa a 105 °C durante 24 horas, y se pesaron nuevamente; de este modo se relacionan los resultados a través de los métodos gravimétrico y volumétrico [24]. Una vez establecida la calibración, el contenido de humedad volumétrico fue obtenido por el promedio entre las lecturas obtenidas con los TDRs en cada unidad experimental.

Los aportes hídricos se realizaron mediante un sistema de riego localizado, por goteo, distanciados a 30 cm, con una línea15 m por fila de plantas. La aplicación de

agua (caudal de 2 mm/hora), se realizó cuando el contenido de humedad alcanzó el umbral crítico del suelo.

La preparación del suelo consistió en una labor de arado 40 días antes del trasplante, hasta una profundidad de 30 cm. Luego se delimitaron las unidades experimentales de acuerdo con el diseño experimental. La producción de plantas de Lactuca sativa se realizó en cepellones, con una duración de 25 días. El trasplante: fue realizado cuando las plantas tenían 4 hojas verdaderas (25 días tras la siembra), en "hileras de plantas" (unidades experimentales) de 1.20 m. de ancho por 15 m de largo, a una distancia de 0.30 x 0.30 m.

El abonado del cultivo se realizó de acuerdo con los resultados del análisis de suelo: Nitrógeno (N) 14.65 kg/ha, Fósforo (P2O5) 92.88 kg/ha, Potasio (K2O) 664.17 kg/ha, Calcio (CaO) 591 kg/ha y Magnesio (MgO) 1841 kg/ha. Los requerimientos de este cultivo, para una producción estimada al aire libre de 60 t/ha son [25]: Nitrógeno (N) 120 kg/ha, Fósforo (P2O5) 55 kg/ha, Potasio (K2O) 250 kg/ha, Calcio (CaO) 60 kg/ha y Magnesio (MgO) 13 kg/ha. La diferencia entre los requerimientos y lo que el suelo disponía se aportó, mediante abonos ecológicos: gallinaza y guano, en tres etapas: como abonado de fondo el 40%, en la siembra el 25% y el 35% restante a los 15 días después del trasplante.

El cultivo de la lechuga se desarrolló desde los 50 - 65 días tras el trasplante hasta los 98-102 días, toda vez se observó desarrollada la planta [26, 27]. Fue cosechada cortando la base del tallo, se pesó, se midió el diámetro del tallo y del cogollo, profundidad y peso de la raíz.

La disposición de los tipos de acolchados: cascarilla de arroz (T1), acículas de pino (T2) y polietileno de color negro (T3) se realizó directamente sobre las unidades experimentales, manualmente, una sola vez por ciclo de cultivo. El grosor de la cobertura sobre el suelo varió según el tipo utilizado: 5 cm de espesor de cascarilla de arroz y de acículas de pino, 15 micras de polietileno negro y sin cobertura las hileras "testigo" (o control).

2.3. Diseño experimental y análisis de datos

El diseño se corresponde con bloques completamente al azar (DBCA) con 3 niveles de 1 tratamiento (T1 a T3 de acolchado) más el testigo (T4) y 3 repeticiones [28]. La variable de bloqueo fue la pendiente. En cada Unidad Experimental (UE: hilera de plantas) había 126 plantas. Se analizó el efecto borde y, para evitarlo, se analizaron 42 plantas (unidad de muestreo, UM) en cada UE, las situadas en las posiciones centrales de las hileras de cultivo. En total se trabajó con 12 UE, ocupando 345 m2 (23 m × 15 m).

Cada variable se analizó de forma independiente: comprobando su ajuste a una distribución normal, transformando la variable cuando se estimó oportuno, y comprobando la homogeneidad de la varianza entre los niveles del tratamiento (acolchado) [29, 30].

Para evaluar el test de hipótesis, donde H0: las medias son iguales entre los distintos tipos de acolchado, sobre los valores de densidad aparente, el peso de la lechuga, diámetro del cogollo y tallo, número de plantas por ha y peso de las plantas por ha, se empleó un Modelo Lineal General [28], con un factor fijo: tipo de acolchado, y con dos: tipo de acolchado y situación de la planta (borde vs. Centro), y un test post hoc de Tukey para evidenciar diferencias entre niveles del factor fijo (Tablas 2, 3, 4, 5 y 6). En lo relativo al pH, Conductividad eléctrica y la temperatura del suelo (máximas y mínimas) se llevó a cabo un Modelo Lineal General de medidas repetidas (al principio del periodo vegetativo y al cosechar). La correlación entre algunas variables se midió con el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 1). En la depuración, exploración y análisis de datos se ha empleado el SPSS (IBM Corp. Released 2019. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0. Armonk, NY: IBM Corp).

3. Resultados y Discusión

En la Tabla A1 puede observarse el resultado del cálculo de la necesidad neta diaria de agua del cultivo de lechuga (Lactuca sativa) durante el ensayo, considerando el día 1 como el del trasplante y el día 58 el de la cosecha.

La temperatura (°C) del suelo bajo los tipos de acolchado (promedio de las máximas: cascarilla de arroz = 21.6; acículas de pino = 21.2; polietileno = 22.8; y testigo = 22.9; promedio de las mínimas: cascarilla de arroz = 18.3; acículas de pino = 17.5; polietileno = 17.9; y testigo = 16.5) no varió entre los tratamientos.

La densidad aparente mostró valores dentro del rango 1.05 - 1.38 g/cm3, observándose un efecto significativo en los tipos de cubierta ($p = 0.013$), siendo significativamente mayor bajo cubiertas de acículas de pino y polietileno respecto del testigo, mientras que la observada bajo la cascarilla de arroz no puede diferenciarse ni de las primeras ni del testigo (Figura 1).

El cultivo ha producido un descenso significativo del pH en general (inicial: 6.516 vs final: 6.156; $p = 0.019$), sin embargo, no podemos descartar que el descenso del potencial de hidrógeno (pH, rango: 4.9 – 6.77) del suelo bajo los distintos tipos de acolchado sean similares. La conductividad eléctrica aumentó significativamente con el desarrollo del cultivo (inicial: 0.186 dS/m vs final: 0.221 dS/m; $p = 0.034$), pero

de igual modo, no podemos descartar que el aumento de la conductividad eléctrica (CE, rango: 0.18 – 0.29) del suelo bajo los distintos tipos de acolchado sean similares.

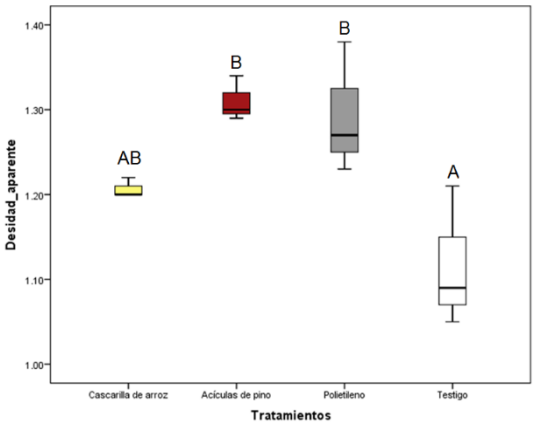


Figura 1: Diagrama de cajas de la densidad aparente (g/cm^3) del suelo bajo los distintos tipos de acolchado. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ($p < 0.05$) tras la aplicación del test post hoc de Tukey.

Se observa una correlación positiva y significativa entre el peso total (g) de la lechuga, diámetro de la planta (cm) y diámetro del tallo (cm), variables con las que definimos la producción de lechugas, de modo que cuando aumentan una lo hace la otra, y así entre las tres variables. La mayor correlación se observa entre el peso total de la planta y el diámetro del tallo (Tabla 1).

Tabla 5: Correlaciones entre las variables productivas de las lechugas. "r": coeficiente de correlación de Pearson; "p": significación; y "N": número de observaciones.

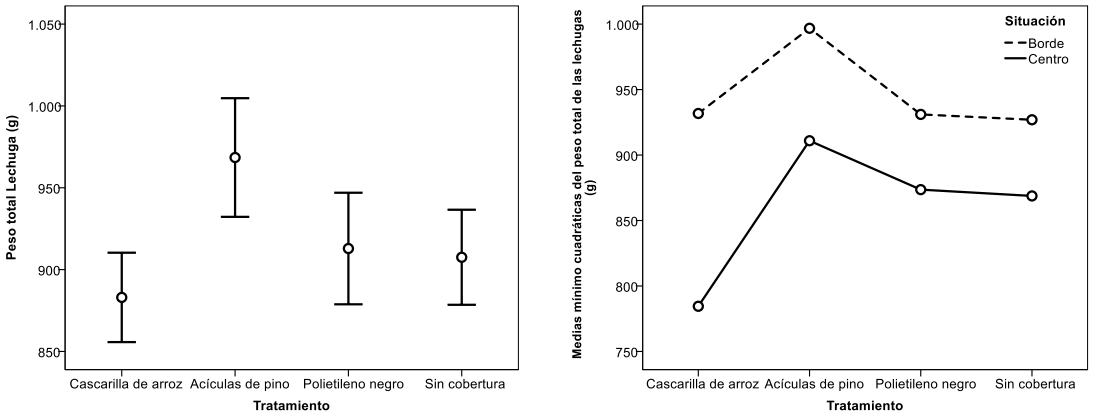
Variables		**Peso total (g)**	**Diámetro cogollo (cm)**	**Diámetro tallo (cm)**
Peso total (g)	r	1	0.494	0.524
	p		<0.001	<0.001
	N	1.468	1.466	1.466
Diámetro cogollo (cm)	r		1	0.427
	p			<0.001
	N		1.466	1.466
Diámetro tallo (cm)	r			1
	p			
	N			1.466

El peso de la lechuga bajo cobertura de acículas de pino (T2) es significativamente mayor que las lechugas con cobertura de cascarilla de arroz (T1) y sin cobertura (T4), siendo el peso medio de la lechuga bajo cobertura de polietileno (T3) indistinto de las lechugas bajo el resto de las coberturas. Por tanto, el tipo de cobertura influye significativamente en el peso total de la planta de lechuga cultivadas en estas condiciones (Tabla 2).

Tabla 6: Medias mínimo cuadráticas del peso de plantas de lechuga según tipo de coberturas. R^2_a: coeficiente de determinación ajustado. SED: error estándar de la diferencia de medias. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ($p < 0.05$) tras la aplicación del test post hoc de Tukey.

Variable	Cobertura				Probabilidad		
	Cascarilla de arroz	Acículas de pino	Polietileno	Testigo	R^2_a	SED	p
Peso (g)	858.120a	953.864b	902.305ab	897.856a	0.027	24.651	0.001

Se observa un efecto significativo de la situación de las plantas, de modo que las que estaban en los bordes de las UE muestran un peso significativamente mayor que las que estaban en el centro de dichas parcelas (946.623 g. vs. 859.450 g.; SED = 17.014 g.; F1,1472 = 26.252; p <0.001) (Fig. 2b).



(a) (b)

Figura 2: Representación gráfica de los intervalos de confianza (95%) del peso medio de cada planta de lechuga según coberturas (a). Medias mínimo cuadráticas del peso de la planta de lechuga según tratamientos y situación en la parcela (b).

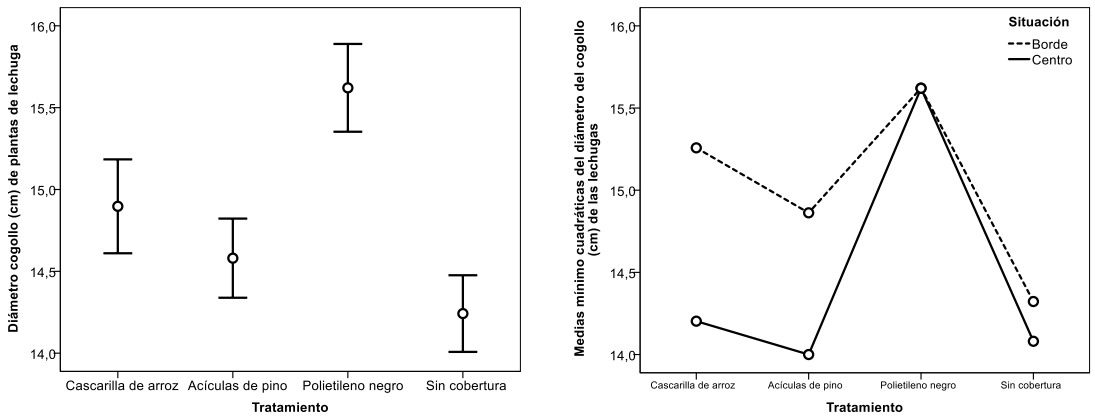
El diámetro del cogollo de las lechugas es significativamente mayor en aquellas que han sido cultivadas bajo polietileno negro que aquellas bajo el resto de las coberturas; mostrando las lechugas cultivadas bajo cobertura con cascarilla de arroz un diámetro significativamente mayor que aquellas sin cobertura, sin poder diferenciarlas de aquellas cultivadas bajo acículas de pino, y éstas sin diferenciarse de las cultivadas sin cobertura (véase Tabla 3 y Figura 3a).

Tabla 7: Medias mínimo cuadráticas del diámetro de plantas de lechuga (cogollo) según tipo de coberturas. R^2_a: coeficiente de determinación ajustado. SED: error estándar de la diferencia de medias. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ($p < 0.05$) tras la aplicación del test post hoc de Tukey.

Variable	Cobertura				Probabilidad		
	Cascarilla de arroz	Acículas de pino	Polietileno	Testigo	R^2_a	SED	p
Diámetro cogollo (cm)	14.730b	14.431ab	15.621c	14.202a	0.050	0.242	<0.001

Se observa un efecto significativo de la situación de las plantas, de modo que las que estaban en los bordes de las parcelas muestran un diámetro del cogollo significativamente mayor que las que estaban en el centro de dichas parcelas (15.016 cm vs. 14.476 cm; SED = 0.140 cm; F1,1463 = 14.984; p < 0.001). En este sentido cabe señalar que las diferencias en el diámetro del cogollo debidas a la posición son más acusadas en las lechugas bajo coberturas de cascarilla de arroz y acículas de pino que sin cobertura, mientras que en las plantas bajo cobertura de polietileno no se observan diferencias (véase Figura 3b).

Además, se observa un efecto significativo de la interacción Tratamiento × Situación (F1,1463 = 9.571; p < 0.023). La significancia de la interacción es debida a la ausencia de diferencias en los diámetros de los cogollos de las plantas cultivadas en los bordes y centro bajo cobertura de polietileno mientras que, en aquellas plantas que se han desarrollado bajo los otros tipos de cobertura, en todos los casos, los diámetros de las plantas de los bordes son significativamente mayores que las del centro. El análisis de las plantas del centro de las UE ofrece las mismas diferencias que el aquí mostrado.



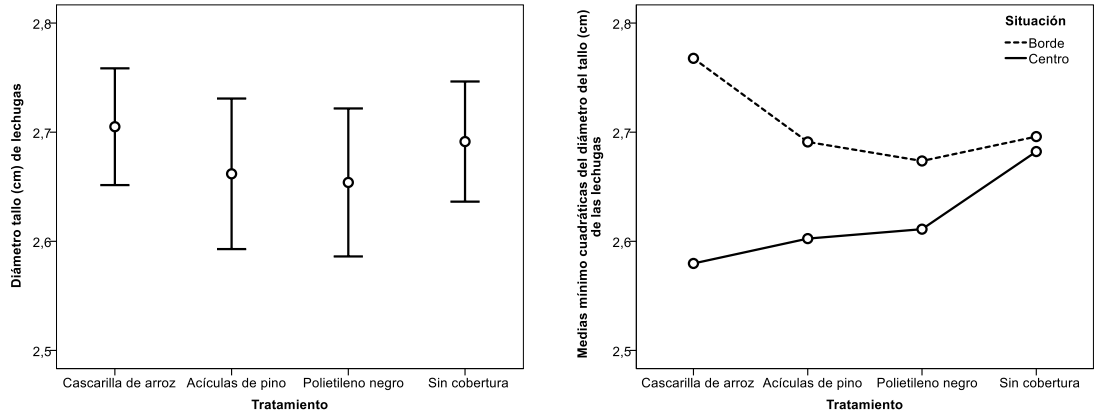
(a) (b)

Figura 3: Representación gráfica de los intervalos de confianza (95%) del diámetro del cogollo (cm) de las plantas de lechuga según coberturas (a). Medias mínimo cuadráticas del diámetro del cogollo (cm) de las plantas de lechuga (kg/ha) según tratamientos y posición en las unidades experimentales (b).

Tabla 8: Medias mínimo cuadráticas del diámetro del tallo en plantas de lechuga según tipo de coberturas. R^2_a: coeficiente de determinación ajustado. SED: error estándar de la diferencia de medias. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas (p < 0.05) tras la aplicación del test post hoc de Tukey.

Variable	Cobertura				Probabilidad		
	Cascarilla de arroz	Acículas de pino	Polietileno	Testigo	R^2_a	SED	p
Diámetro tallo (cm)	2.674	2.647	2.642	2.689	0.004	0.048	0.721

No podemos descartar que el diámetro del tallo sea similar bajo los distintos tipos de acolchado (Tabla 4 y Figura 4a). Mientras que se observa un efecto significativo de la situación de las plantas, de modo que las que estaban en los bordes de las parcelas muestran un diámetro del tallo significativamente mayor que las que estaban en el centro de dichas parcelas (2.707 cm vs. 2.619 cm; SED = 0.033 cm; F1,1473 = 7.075; p = 0.008). En este sentido cabe señalar que las diferencias en el diámetro del tallo debidas a la posición son más acusadas en las lechugas bajo coberturas de cascarilla de arroz (T1), decreciendo las diferencias en aquellas bajo acículas de pino (T2) y polietileno (T3), mientras que en aquellas sin cobertura (T4), es cuando la diferencia se minimiza (véase Figura 4b).



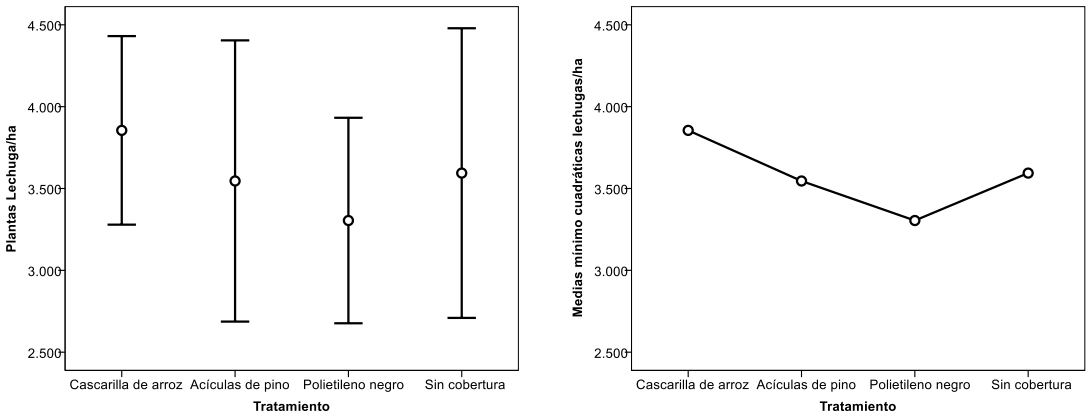
(a) (b)

Figura 4: Representación gráfica de los intervalos de confianza (95%) del diámetro del tallo (cm) de las plantas de lechuga según coberturas (a). Medias mínimo cuadráticas del diámetro del tallo (cm) de las plantas de lechuga (kg/ha) según tratamientos y posición en las unidades experimentales (b).

Sobre el número de plantas que, en función de la cobertura y su situación, han sobrevivido y contribuido al rendimiento de la cosecha (Figura 5 y Tabla 5). Los resultados de la Tabla 5 ponen en evidencia que no se puede afirmar que hayan sobrevivido un número diferente de plantas de lechuga en función de los distintos tipos de cobertura empleados. No se observa efecto borde en el número de plantas.

Tabla 9: Medias mínimo cuadráticas del número de plantas de lechuga/ha según tipo de coberturas. R^2_a: coeficiente de determinación ajustado. SED: error estándar de la diferencia de medias. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ($p < 0.05$) tras la aplicación del test post hoc de Tukey.

Variable	Cobertura				Probabilidad		
	Cascarilla de arroz	Acículas de pino	Polietileno	Testigo	R^2_a	SED	p
Lechugas/ha	3.855,07	3.545,89	3.304,35	3.594,20	0.156	246.33	0.248



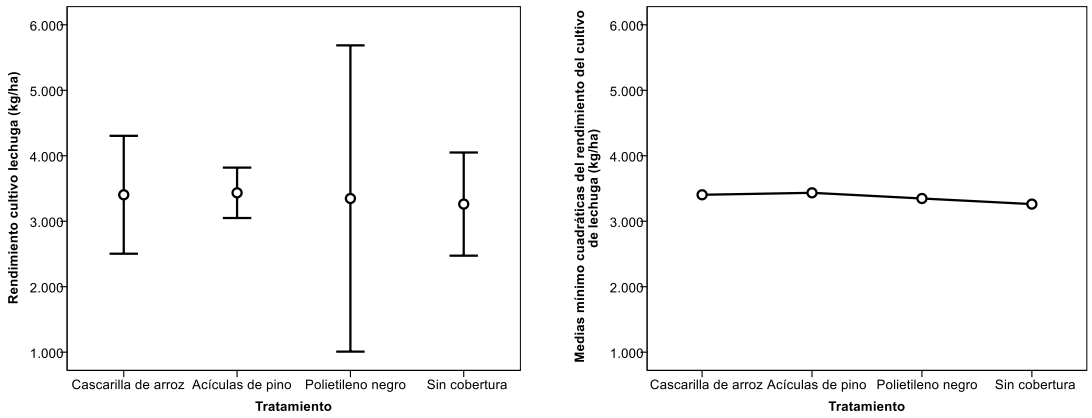
(a) (b)

Figura 5: Representación gráfica de los intervalos de confianza (95%) del número de plantas de lechuga/ha según coberturas (a). Medias mínimo cuadráticas del número de plantas de lechuga/ha según tratamientos (b).

Y por último nos interesamos por comprender la influencia de las coberturas sobre el rendimiento del cultivo, entendido éste como el peso de lechugas por ha cultivada (Tabla 6 y Figura 6). Los datos de la Tabla 6 indican que los rendimientos del cultivo de lechugas bajo las distintas coberturas no han sido distintos al cultivo sin cobertura (véase Figura 6). Es reseñable que, en el caso de la cobertura con polietileno, la variabilidad resulta extremadamente alta, comparada con el resto de los tratamientos. No se observa efecto borde en el rendimiento del cultivo.

Tabla 10: Medias mínimo cuadráticas del rendimiento del cultivo de lechuga (kg/ha) según tipo de coberturas. R^2_a: coeficiente de determinación ajustado. SED: error estándar de la diferencia de medias. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ($p < 0.05$) tras la aplicación del test post hoc de Tukey.

Variable	Cobertura				Probabilidad		
	Cascarilla de arroz	Acículas de pino	Polietileno	Testigo	R^2_a	SED	p
Peso lechugas (kg/ha)	3.404,130	3.434,152	3.347,377	3.261,916	0.312	262.678	0.888



(a) (b)

Figura 6: Representación gráfica de los intervalos de confianza (95%) del rendimiento del cultivo de lechuga (kg/ha) según coberturas (a). Medias mínimo cuadráticas del rendimiento del cultivo de lechuga (kg/ha) según tratamientos (b).

4. Conclusiones

- El uso de acolchado reduce las fluctuaciones de temperatura a 10 cm de profundidad en el suelo, con pequeñas variaciones que dependen del material utilizado.
- La aplicación de acolchado modifica la estructura del suelo, siendo los tratamientos con acículas de pino y polietileno los que presentan la mayor densidad aparente.
- El peso de las lechugas individuales bajo cobertura de acículas de pino fue significativamente mayor que bajo el resto de las coberturas; y el diámetro del cogollo lo fue de igual modo bajo cobertura de polietileno.
- La producción de lechuga (plantas/ha y kg/ha), y el diámetro del tallo no mostraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos de acolchado.

Contribución de los autores: "Conceptualización, metodología, E.E.L. and I.R.B; validación, E.E.L., I.R.B. and A.J.A.; Análisis formal, A.J.A.; Recursos, E.E.L.; escritura—Preparación del borrador original, A.J.A.; Redacción: revisión y edición, A.J.A.; supervisión, I.R.B. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: El APC fue financiado por el "Proyecto PROMETEO, Ministerio de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación. Quito, Ecuador".

Estado disponibilidad de los datos: Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el presente estudio están a disposición del autor de la correspondencia previa solicitud razonable.

Agradecimientos: A la Universidad de Cuenca (Ecuador), a través de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, sección: agronomía, por permitir el ensayo en sus instalaciones, así como por los medios para regar.

Conflicto de intereses: los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Anexo A

Tabla A11: Resultado del cálculo de la necesidad neta diaria de agua del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa)* durante el ensayo, considerando el día 1 como el del trasplante y el día 58 el de la cosecha. ET_0: Evapotranspiración de referencia.

Día	ET_0	Coeficiente de cultivo (Kc)		Evapotranspiración del cultivo	Precipitación efectiva		Necesidad Neta (mm)
		Fase	Valor Kc	ETc (mm/d)	Promedio (mm/día)	P. efectiva (mm/día)	
1-4	1.71	Inicial (22 días)	0.70	1.20			1.20
5	1.71		0.70	1.20	0.25	0.25	0.95
6	1.71		0.70	1.20	2.28	2.27	-1.07
7	1.71		0.70	1.20	3.04	3.03	-1.83
8	1.71		0.70	1.20	0.50	0.50	0.70
9	1.71		0.70	1.20			1.20
10	1.71		0.70	1.20	7.87	7.77	-6.57
11	3.26		0.70	2.28	20.82	20.13	-17.84
12	4.16		0.70	2.91	0.00	0.00	2.91
13	1.38		0.70	0.97	2.60	2.59	-1.62
14	1.55		0.70	1.09	8.20	8.09	-7.01
15	2.79		0.70	1.95	4.80	4.76	-2.81
16	1.55		0.70	1.09	4.40	4.37	-3.28
17	2.02		0.70	1.41	1.40	1.40	0.02
18	3.39		0.70	2.37			2.37
19	2.86		0.70	2.00	0.40	0.40	1.60
20	2.17		0.70	1.52	5.00	4.96	-3.44
21	2.72		0.70	1.90	2.80	2.79	-0.88
22	1.65		0.70	1.16	2.60	2.59	-1.43
23	2.69	Desarrollo (20 días)	0.72	1.93	0.00	0.00	1.93
24	2.16		0.74	1.59	2.00	1.99	-0.41
25	2.38		0.75	1.79	18.20	17.67	-15.88
26	2.29		0.77	1.76			1.76
27	2.48		0.79	1.95	0.20	0.20	1.75
28	1.48		0.81	1.19	3.60	3.58	-2.39
29	2.20		0.82	1.81			1.81
30	2.79		0.84	2.34			2.34
31	2.93		0.86	2.51	1.00	1.00	1.51
32	2.09		0.88	1.83	0.20	0.20	1.63
33	3.27		0.89	2.92	0.20	0.20	2.72
34	2.46		0.91	2.24	0.20	0.20	2.04
35	1.84		0.93	1.71	2.80	2.79	-1.08
36	2.39		0.94	2.26			2.26
37	2.10		0.96	2.02			2.02
38	2.57		0.98	2.52	0.20	0.20	2.32
39	2.14		1.00	2.13	1.00	1.00	1.14
40	3.94		1.02	4.00			4.00
41	3.89		1.03	4.02	5.60	5.55	-1.53
42	1.84		1.05	1.93	1.20	1.20	0.73
43	3.63	Media (15 días)	1.05	3.81			3.81
44	3.76		1.05	3.95			3.95
45	3.70		1.05	3.89			3.89
46	3.30		1.05	3.47	1.00	1.00	2.47
47	3.50		1.05	3.68	22.06	21.28	-17.61

Día	ET_0	Coeficiente de cultivo (Kc)		Evapotranspiración del cultivo	Precipitación efectiva		Necesidad Neta (mm)
		Fase	Valor Kc	ETc (mm/d)	Promedio (mm/día)	P. efectiva (mm/día)	
48	3.70		1.05	3.89	1.20	1.20	2.69
49	4.10		1.05	4.31			4.31
50	3.70		1.05	3.89	1.40	1.40	2.49
51	4.10		1.05	4.31	4.40	4.37	-0.06
52	3.70		1.05	3.89	0.20	0.20	3.69
53	3.40		1.05	3.57	3.79	3.77	-0.20
54	3.30		1.05	3.47	0.80	0.80	2.67
55	3.20		1.05	3.36	3.59	3.57	-0.21
56	3.30		1.05	3.47	4.99	4.95	-1.49
57	3.50		1.05	3.68			3.68
58	3.70		1.05	3.89			3.89

Referencias

1. Postel, S.L., *Entering an era of water scarcity: The challenges ahead.* Ecological Applications, **2000**. 10(4): p. 941-948.
2. Tiaguaro, Y., et al., *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2021 – 2026*, ed. S. Subsecretaría de Agua Potable, Riego y Drenaje. 2022, Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). 131.
3. Zapatta Carpio, A., et al., *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2019 - 2027*. 2019, Quito, Ecuador: Subsecretaría de Riego y Drenaje. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). 160.
4. Martínez, A., *Water use efficiency in horticultural crops: A case study in Ecuador.* Journal of Horticultural Research, **2012**. 21(5): p. 245–258.
5. Velasco-Muñoz, J.F., et al., *Sustainable Irrigation in Agriculture: An Analysis of Global Research.* Water, **2019**. 11(9): p. 1758.
6. Contreras, S., M.A. Bennett, and D. Tay, *Restricted Water Availability During Lettuce Seed Production Decreases Seed Yield per Plant but Increases Seed Size and Water Productivity.* HortScience, **2008**. 43(3): p. 837-844.
7. Damerum, A., et al., *The genetic basis of water-use efficiency and yield in lettuce.* BMC Plant Biology, **2021**. 21(1): p. 237.
8. Michelon, N., et al. *Strategies for Improved Water Use Efficiency (WUE) of Field-Grown Lettuce (Lactuca sativa L.) under a Semi-Arid Climate*. Agronomy, 2020. **10**, DOI: 10.3390/agronomy10050668.
9. Chen, Y. and J. Katan, *Effect of solar heating of soils by transparent polyethylene mulching on their chemical properties.* Soil Science, **1980**. 130(5).
10. Ullah, I., et al., *Mulching: A New Concept for Climate Smart Agriculture*, in *Mulching in Agroecosystems: Plants, Soil & Environment*, K. Akhtar, et al., Editors. 2022, Springer Nature Singapore: Singapore. p. 289-313.
11. Abdullah, K., et al., *Effects of Mulch and Irrigation Water Amounts on Lettuce`s Yield, Evapotranspiration, Transpiration and Soil Evaporation in Isparta Location, Turkey.* Journal of Biological Sciences, **2004**. 4: p. 751-755.
12. Dewedar, O.M., et al. *Maximizing irrigation water use and crop productivity under mulching with geotextile for lettuce plants (Lactuca sativa L. var. capitata)*. in *BIO Web of Conferences*. 2024. EDP Sciences.
13. Pacetti, T., et al., *Water footprint and water productivity analysis of an alternative organic mulching technology for irrigated agriculture.* Agricultural Water Management, **2025**. 310: p. 109380.
14. Zhang, P., et al., *Effects of organic mulching on moisture and temperature of soil in greenhouse production of tomato under unheated greenhouse cultivation in the cold zone of China.* Food Science & Nutrition, **2023**. 11(8): p. 4829-4842.
15. Montilla-Pacheco, A., et al., *Contribución al estudio de la geografía climática del Ecuador continental.* Revista Ciencia UNEMI, **2024**. 17(44): p. 237-248.

16. Bouyoucos, G.J., *Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method.* Soil Science, **1936**. 42(3): p. 225-230.
17. Reynolds, W.D. and D.E. Elrick, *In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α-parameter using the guelph permeameter.* Soil Science, **1985**. 140(4): p. 292-302.
18. Gee, G.W. and J.W. Bauder, *Particle-size Analysis*, in *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, A. Klute, Editor. 1986, American Society of Agronomy, Inc.: Madison, USA. p. 383-411.
19. Topp, G.C. and P.A. Ferré, *Water Content*, in *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, J.H. Dane and G.C. Topp, Editors. 2002, Soil Science Society of America, Inc.: Madison, WI, USA. p. 417-545.
20. Allen, R.G., et al., *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56)*. 1998, Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
21. Bates, R.G., *Determination of pH, Theory and Practice*. 2nd ed. 1973, New York, USA: John Wiley & Sons. 479.
22. Willard, H.H., L.L. Merritt, and J.A. Dean, *Instrumental methods of analysis*. 5th ed. 1974, New York, USA: Van Nostrand Company, Inc.
23. NRCS, *Small Watershed Hydrology. WinTR–55 User Guide*. 2009: Conservation Engineering Division, Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. 142.
24. Vargas, J.G., R. España, and J. Guerrero, *Probe calibration for TDR-300 for measurements moisture soil in San Rafael de Onoto, Portugesa State.* Revista Unellez de Ciencia y Tecnología, **2011**. 29: p. 89-93.
25. Maynard, D.N. and G.J. Hochmuth, *Soils and Fertilizers*, in *Knott's Handbook for Vegetable Growers*, D.N. Maynard and G.J. Hochmuth, Editors. 2006, John Wiley & Sons, Inc. p. 143-248.
26. Chiesa, A., P. Tittonell, and J. de Grazia, *Efecto de la época de siembra, radiación y nutrición nitrogenada sobre el patrón de crecimiento del cultivo de lechuga (Lectuca sativa L.).* Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales, **2001**. 16(3): p. 355-365.
27. FAO, *Capítulo 6: Producción Vegetal*, in *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. 2002, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Roma.
28. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 5th ed. 2001, New York (USA): John Wiley & Sons, Inc. 699.
29. Bartlett, M.S., *Properties of sufficiency and statistical tests.* Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, **1937**. 160(901): p. 268-282.
30. Shapiro, S.S. and M.B. Wilk, *An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples).* Biometrika, **1965**. 52(3/4): p. 591-611.

Riego Deficitario Optimizado para Volúmenes Limitados de agua y Cultivos Simultáneos. La metodología ORDILS.

H. Martínez-López [1,] *, J.J. Pardo[1], J.A. Martínez-López[1], A. Martínez-Romero[1], A. Domínguez.

[1] Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla La Mancha (UCLM). Unidad Asociada "Teledetección, Agronomía y Riego" de la UCLM al Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE) del CSIC, 02071 Albacete, España.

*Correspondence: Higinio.martinez@uclm.es

Abstract: En ciertas zonas de España y otras mediterráneas con escasos recursos hídricos, las autoridades controlan el agua de riego mediante contadores. Los agricultores enfrentan dos problemas clave. El primero es elegir que cultivos sembrar y su superficie, considerando agua y tierra disponibles, pese a la incertidumbre climática. El segundo es distribuir el agua para maximizar rendimientos, evitando que los cultivos más rentables sufran déficit. Como solución se propone el algoritmo ORDILS (Riego Deficitario Optimizado para Volúmenes Limitados de Agua de Riego y Cultivos Simultáneos), diseñado con base a experiencias de proyectos nacionales y europeos. El algoritmo parte de una situación inicial y, según el agua disponible, rendimientos previstos, y parámetros económicos, ajusta el riego y la superficie de cultivo para maximizar la rentabilidad. Para validar ORDILS, se realizó un experimento de tres años con ajo morado, cebada y maíz en Albacete (España). Se plantearon dos estrategias: a) la de un agricultor típico, que prioriza el riego no deficitario y reserva agua para el cultivo más rentable (ajo morado); y b) ORDILS. El ensayo busca evaluar el impacto de ORDILS en rendimiento, calidad de la cosecha, productividad del agua, huella hídrica y rentabilidad de una explotación típica. La comparación entre estrategias mostró mejoras del +2% (2022), -9% (2023) y +12% (2024) en el margen bruto. Las condiciones climáticas y los precios anómalos de 2022-2023 llevaron a ajustar el algoritmo, mejorando los resultados en 2024. Los resultados estuvieron influenciados por el ajo, cuyo manejo fue muy similar en ambos escenarios. Sin embargo, ORDILS mejoró la rentabilidad de cebada y maíz un 110% respecto al agricultor en 2024, mostrando su eficacia. Se prevé un nuevo ensayo en 2025 para validar estos resultados, confirmando que ORDILS ayuda a obtener buenas cosechas incluso bajo condiciones climáticas adversas.

Keywords: déficit hídrico; rentabilidad; cambio climático; agua-margen bruto; programación de riego.

1. Introducción.

En regiones con escasez de recursos hídricos, es fundamental establecer estrategias para gestionar el agua de riego de manera equitativa y eficiente, garantizando el abastecimiento actual y la conservación de los recursos hídricos futuros. Por tanto, el uso del agua de riego suele estar regulado por las entidades gestoras, lo que

plantea a los productores de cultivos extensivos dos principales desafíos: 1) la determinación de la selección de cultivos y la asignación de superficie destinada a cada uno de ellos; y 2) la gestión eficiente de los volúmenes disponibles de agua de riego a través de una adecuada programación de riegos con el fin de optimizar la rentabilidad de las explotaciones. Esta problemática se acentúa en los cada vez más frecuentes escenarios climáticos adversos, donde las necesidades de riego se incrementan superando en muchos casos la disponibilidad de recursos hídricos. Por tanto, la rentabilidad de una explotación agrícola podría incrementarse mediante la optimización de la distribución del agua de riego limitada a lo largo de la campaña, priorizando el aporte hídrico a los cultivos más rentables, en detrimento de aquellos de menor valor económico. Del mismo modo, sería factible poder ajustar la superficie cultivada hasta el momento de la siembra, en función de las condiciones climáticas acontecidas durante la campaña. Para este propósito, se ha desarrollado la metodología ORDILS (Optimized Regulated Deficit Irrigation for Limited Volumes of irrigation water and Simoultaneous crops) que, en combinación con el modelo MOPECO (Modelo de Optimización Económica del riego) [1],constituye una herramienta para la gestión en tiempo real del agua y la superficie cultivable en las explotaciones agrícolas. El objetivo de este estudio ha sido evaluar los resultados obtenidos durante tres años de ensayos, comparando el manejo propuesto por la metodología ORDILS frente a un agricultor tradicional en una explotación que cultiva simultáneamente tres cultivos extensivos ampliamente extendidos por la zona: ajo morado (Allium sativum L.), cebada (Hordeum vulgare L.) y maíz (Zea mays L.).

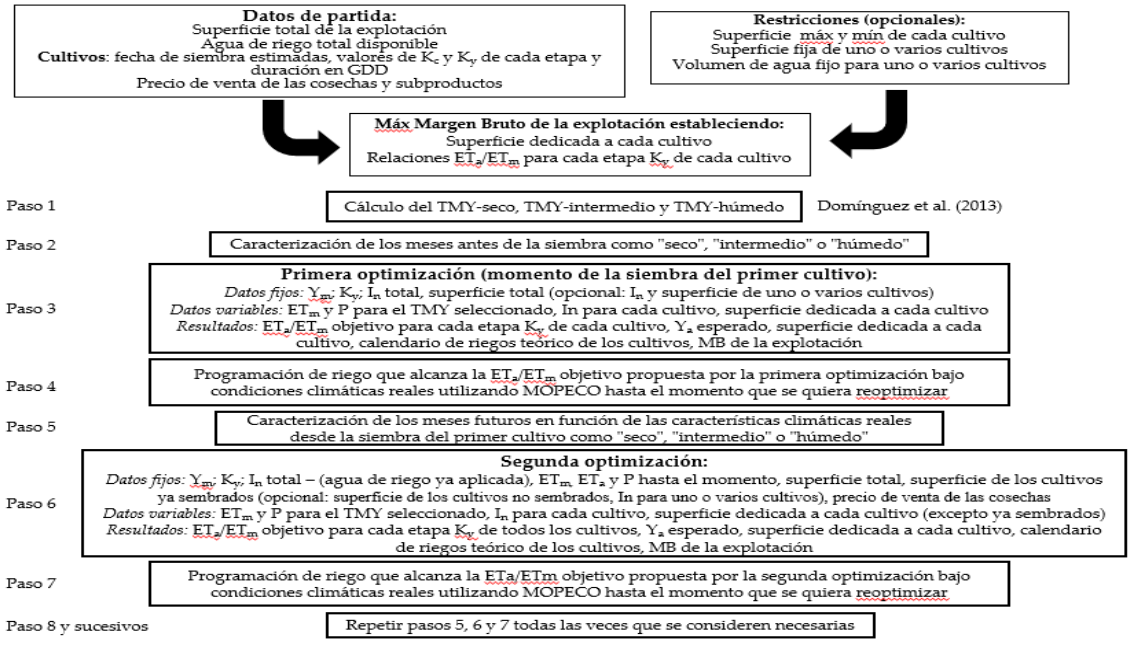
2. Materiales y Métodos.

2.1. Localización del ensayo experimental.

El ensayo experimental se llevó a cabo durante tres años (2022-2024) en una parcela de 3.240 m2 ubicada en el Centro Integral de Formación Profesional de Aguas Nuevas, Albacete (España) (coordenadas 38º 57’ 0” N, 1º 54’ 3” W; altitud: 677 m. s. n. m). El clima de la zona esta caracterizado como Mediterráneo (MeTE) [2] En la zona de estudio, la temperatura máxima media diaria se da en verano (36 ºC). La temperatura media diaria presenta una notable variabilidad estacional (5,3 ºC en enero y 26 ºC en julio). La precipitación anual promedio es de aproximadamente 330 mm, concentrándose principalmente en otoño y primavera. Por otro lado, la evapotranspiración de referencia acumulada anualmente (ETo) se sitúa alrededor de 1300 mm.

2.2. La metodología ORDILS.

ORDILS es una metodología innovadora que, tomando y adaptando el enfoque de metodologías anteriores como ORDI [3] y ORDIL [4], busca maximizar el margen bruto (MB) de una explotación agrícola en función de la superficie total cultivable y del volumen de agua de riego disponible para un conjunto de cultivos extensivos anuales simultáneos durante la campaña de riego. El algoritmo determina, en cualquier momento del ciclo del cultivo, la cantidad óptima de agua de riego a aplicar, así como la superficie teórica asignable a cada uno hasta la fecha de siembra, momento en el cual dicha asignación se consolida. Para ello, considera factores clave como la sensibilidad de cada etapa al déficit hídrico, el rendimiento y la rentabilidad previstos al cierre de campaña, las condiciones climáticas reales hasta el momento en que se requiere una nueva optimización y predicciones meteorológicas futuras, utilizando tanto las previsiones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMeT) para los próximos siete días como la metodología TMY (Typical Meteorological Year) [5].El algoritmo maximiza el MB mediante sucesivas iteraciones no lineales, que requieren una serie de datos de entrada y el cumplimiento de una serie de restricciones (Fig. 1). Todo esto se integra en el modelo MOPECO para generar calendarios de riego optimizados y simular el rendimiento de los cultivos en función de la disponibilidad hídrica a lo largo del ciclo de desarrollo de cada cultivo.



Kc: coeficiente de cultivo; Ky: factor de respuesta del rendimiento al déficit; GDD: duración de las fases de crecimiento en grados-día de crecimiento (ºC); ETm y ETa: evapotranspiración máxima y real (mm); Ym y Ya: rendimiento simulado potencial y real (kg ha-1); TMY: año meteorológico típico; MB: margen bruto (€ ha-1); P: precipitación (mm); In: dosis neta de riego (mm).

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología ORDILS.

2.3. Diseño experimental.

En la parcela experimental se ha simulado una explotación agrícola de 100 hectáreas, con una dotación de riego de 4.000 m3 ha-1, donde se cultiva de forma simultánea ajo morado ("Ajo morado de las Pedroñeras"), cebada (cv. Planet) y maíz (cv. Fontero), aplicando dos tratamientos: T1, que simula el manejo convencional de un agricultor tipo, el cual prioriza el riego en función de la rentabilidad, aplicando en muchos casos en los cultivos más rentables (ajo en este caso) para tratar de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos hasta un 30% más de agua [6] y T2, basado en ORDILS, ajustando dinámicamente el agua de riego y la superficie cultivada para maximizar la rentabilidad. Cada tratamiento incluyó 4 repeticiones en parcelas de 18 m x 3,5 m distribuidas al azar, regadas con un sistema de riego por goteo de marco cuadrado (0,5 m x 0,5 m) dotado con emisores de 4 l h-1 (16 mm h-1). Se realizó un seguimiento fenológico semanal y una evaluación de rendimiento al final de la campaña. Del mismo modo, se registraron labores, fertilización y tratamientos fitosanitarios para calcular los costes de producción y determinar el MB de cada tratamiento.

3. Resultados.

3.1. Distribuciones de cultivos.

La distribución de cultivos realizada por el "Agricultor" (T1) difirió de la estrategia propuesta por "ORDILS" (T2) a lo largo de los tres años analizados (Tabla 1). Sin embargo, a pesar de estas diferencias, ambas estrategias de manejo coincidieron en posicionar al cultivo más rentable (ajo morado) como cabeza de rotación, ocupando la máxima superficie disponible para una rotación de 4 años (25 ha), en consonancia con las características de la explotación. En cuanto al cultivo de cebada, T1 mantuvo constante la superficie cultivada durante los 3 años, mientras que T2 optó por una estrategia más dinámica (Tabla 1), cultivando la mitad de superficie que T1 durante las dos primeras campañas, incrementándola en 2024 (49 ha). ORDILS siempre optó por cultivar más superficie de maíz que el manejo tradicional (46 ha vs 14 ha en 2022, 36 ha vs 5 ha en 2023, 20 ha vs 6,5 ha en 2024), ya que estimaba que, bajo riego deficitario, la mayor superficie dedicada compensaría económicamente los menores rendimientos previstos.

Tabla 1. Resumen de superficies, rendimientos, y riego bruto en ambos manejos para cada campaña experimental.

Año	Cultivo	Superficie (ha)		Rendimiento (kg ha^{-1})		Rendimiento total (t)		I_G (m^{3}ha^{-1})	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
2022	A	25	25	9.660	9.510	241,5	237,7	4.775	4.070
	C	50	25	9.674	9.479	483,7	236,9	3.231	2.999
	M	14	46	12.353	10.304	172,9	473,9	6.525	4.847
2023	A	25	25	9.340	9.390	233,5	234,7	6.524	5.561
	C	50	25	9.189	8.748	459,4	218,7	3.494	2.940
	M	5	36	13.842	8.908	69,2	320,7	6.565	5.275
2024	A	25	25	8.430	8.360	210,7	209	5.851	4.986
	C	50	49	9.364	8.546	468,2	418,7	4.185	3.160
	M	6,5	20	17.473	16.908	113,5	338,1	6.830	5.859

T1: tratamiento "Agricultor"; T2: tratamiento "ORDILS"; A: ajo; C: cebada; M: maíz; I_G: riego bruto;

3.2. Rendimientos y rentabilidad.

Durante los tres años de ensayo se produjeron diferencias notables de rendimientos y rentabilidad entre ambos escenarios (**Tabla 1; 2**). En 2022, T2 alcanzó una rentabilidad total de aproximadamente un 2% superior a la de T1. Esta mejora fue debida principalmente gracias a un uso más eficiente del agua de riego. Así, en el cultivo de ajo, T2 obtuvo un rendimiento similar a T1, pero aplicando aproximadamente un 15% menos de agua (**Tabla 1**). Del mismo modo, en cebada, T2 redujo su uso un 7%, obteniendo un rendimiento ligeramente inferior a T1 (-2%) (**Tabla 1**). Sin embargo, esto permitió ahorrar algo de agua para aplicar a los restantes cultivos. Por último, aunque el rendimiento de maíz fue un 16% menor en T2, la metodología aplicó un 26% menos de agua, lo que aumentó significativamente su productividad hídrica y, junto con la diferencia de superficie cultivada de maíz (32 ha) frente a T1, pudo compensar la pérdida de rendimiento obteniendo un MB total más elevado (**Tabla 2**).

Tabla 2. Rentabilidad prevista y real. Productividad agronómica y económica del agua de riego durante los 3 años de ensayo.

	Escenario previsto			**Escenario real**				
Cultivo	**MB (€ ha^{-1})**	**MB por cultivo (€)**	**MB Total (€)**	**MB por cultivo (€)**	**MB por cultivo (€)**	**MB Total (€)**	**YWP (kg/m^3)**	**GEWP (€ m^{-3})**
A T1 2022	4.286	107.157		4.228	105.691		2,02	0,89
C T1 2022	743	37.192	162.141	1.384	69.200	196.142	2,99	0,43
M T1 2022	1.274	17.790		1.522	21.252		1,89	0,23
A T2 2022	4.436	110.919		4.369	109.213		2,34	1,07
C T2 2022	762	18.897	179.983	1.517	37.611	199.973	3,16	0,51
M T2 2022	1.086	50.167		1.150	53.149		2,13	0,24
Mejora ORDILS (%)			**+11,0**	**Mejora ORDILS (%)**		**+1,95**		
A T1 2023	4.229	105.715		5.261	131.526		1,43	0,81
C T1 2023	736	36.788	148.900	371	18.554	154.076	2,63	0,11
M T1 2023	1.279	6.396		799	3996		2,11	0,12
A T2 2023	4.323	108.077		5.454	136.338		1,69	0,98
C T2 2023	746	18.652	166.621	385	9.635	140.760	2,98	0,13
M T2 2023	1.122	39.890		-147	-5.213		1,69	-0,03
Mejora ORDILS (%)			**+11,9**	**Mejora ORDILS (%)**		**-8,64**		
A T1 2024	4.226	105.656		9.018	225.457		1,44	1,54
C T1 2024	594	29.733	142.883	411	20.527	250.448	2,24	0,10
M T1 2024	1.152	7.493		1.573	4.464		2,56	0,23
A T2 2024	4.330	108.250		9.148	228.700		1,68	1,83
C T2 2024	579	28.525	162.467	404	19.917	281.136	2,70	0,13
M T2 2024	1.257	25.691		1.592	32.518		2,89	0,27
Mejora ORDILS (%)			**+13,7**	**Mejora ORDILS (%)**		**+12,3**		

A: ajo; C: cebada; M: maíz; T1: "Agricultor"; T2: "ORDILS"; YWP: Productividad agronómica del agua de riego; GEWP: productividad económica del agua de riego.

En 2023, T2 continuó mostrando una mayor eficiencia en el uso del agua, particularmente en ajo, donde nuevamente alcanzó rendimientos similares utilizando un 15% menos de agua. Sin embargo, en maíz, el rendimiento fue un 35% inferior, repercutiendo en un MB negativo para este cultivo (**Tabla 2**) y en la rentabilidad total de la explotación, que fue un 9% menor en comparación con T1. Fruto de estos resultados, para la campaña de 2024 se realizó un ajuste de la metodología de forma que limitara el nivel de déficit a aplicar en el cultivo de maíz, concentrando en la medida de lo posible el déficit hídrico de este cultivo a la etapa de crecimiento vegetativo. De esta forma, en 2024, T2 experimentó una notable mejora, logrando un MB total un 12% superior a T1. Aunque durante esa campaña los rendimientos en maíz y cebada fueron ligeramente inferiores (-3,2% y -9%, respectivamente), la significativa reducción en el uso del agua (-14% y -24%) junto con una distribución de superficie notablemente diferente a la de T1 permitió una optimización de la rentabilidad. Por otro lado, en el caso de T1, al no conocer este

tipo de metodologías de ayuda a la toma de decisiones, el MB asociado al cultivo de maíz se vio fuertemente influenciado, ya que, para poder ajustarse a la cantidad total de agua disponible, tuvo que dejar de regar aproximadamente el 50% de la superficie de maíz cultivada. Esa superficie solamente generó costes (labores, fertilizantes…), lo que repercutió en el MB total asociado a dicho cultivo, el cual fue un 86% inferior a T2 (**Tabla 2**). Aunque para las tres campañas, los resultados globales estuvieron fuertemente influenciados por el cultivo de ajo (representa aproximadamente el 54%, 91% y 86% del ingreso total para 2022, 2023 y 2024 respectivamente), la suma de maíz y cebada muestra unos resultados prometedores especialmente en la campaña de 2024. Durante la primera campaña (2022), los precios de venta de la cebada fueron aproximadamente un 54% superiores a los precios medios históricos (similares a los de la campaña 2024) debido al conflicto en Ucrania. Por tanto, con la distribución de superficies de la campaña 2022 y de haberse mantenido esos precios medios, T2 habría obtenido un 48% más de rentabilidad en el conjunto de cebada y maíz con respecto a T1. Por otro lado, en 2024, T2 obtuvo 29.444 € más que T1 (+110%) para estos dos cultivos con precios de venta similares a los históricos, diferenciando notablemente el MB total obtenido entre ambos manejos (**Tabla 2**). En cuanto al cultivo del ajo analizado de manera independientemente, la comparativa entre ambos escenarios no se ha visto influenciada por la variabilidad de sus precios de venta durante las tres campañas ya que los manejos en ambos casos han sido similares (misma superficie cultivada, semejantes rendimientos y costes).

3.3. Productividad del agua de riego.

Durante las tres campañas experimentales se ha determinado la productividad agronómica (kg m^{-3}) y económica (€ m^{-3}) del agua de riego para ambos tratamientos. En términos generales T2 mejoró ambas productividades frente a T1 para todos los cultivos y campañas estudiadas. Así, T2 obtuvo de media para las tres campañas un valor de productividad agronómica un +17%, +13% y +2% en ajo, cebada y maíz respectivamente y un +20%, +24% y -34% en términos de productividad económica. Los bajos valores de rendimiento obtenidos durante la campaña de 2023 en maíz empeoraron estos valores medios de productividad del agua. No obstante, fruto del ajuste del algoritmo para la campaña de 2024, los valores de productividad del agua tanto agronómica como económica fueron un 17% y 22% superiores a T1.

4. Discusión

4.1. Distribuciones de cultivos.

La mayor divergencia entre ambas estrategias se observó en la superficie destinada al maíz. En 2022, las condiciones climáticas extremadamente secas afectaron

significativamente a T2, ya que casi el 50% de la explotación estaba dedicada a este cultivo de alta demanda hídrica. Esto obligó a aplicar un déficit mayor del previsto, lo que resulto en una considerable disminución del rendimiento y margen bruto (MB) (**Tabla 1;2**). Por el contrario, el T1 al destinar solamente una superficie mucho menor al cultivo de maíz y haber ahorrado agua en los meses previos gracias a una favorable distribución de precipitaciones, pudo satisfacer completamente las necesidades de riego del maíz durante esta campaña. En la siguiente campaña (2023), una primavera más seca de lo habitual llevaron a T1 a reducir la superficie de maíz en un 66% respecto de la distribución inicial (de 15 a 5 ha) en el momento de la siembra del maíz, debido a que la cantidad total de agua disponible se excedía aproximadamente un 6%. En contraste, T2 solamente disminuyó su superficie prevista en un 1%. Sin embargo, al igual que en 2022, las condiciones extremadamente secas del verano ocasionaron, junto con el déficit hídrico aplicado durante la etapa de llenado del grano del maíz, una notable disminución del rendimiento del maíz, traducido en un MB negativo asociado a este cultivo (**Tabla 2**). Por último, en 2024, T1 inicialmente sembró la superficie prevista de maíz (13 ha), aunque al momento de la siembra ya excedía la disponibilidad de agua en un 3% aproximadamente. Posteriormente, las condiciones climáticas reales del verano fueron secas, por lo que T1 se vio obligado a dejar de regar aproximadamente el 50% de la superficie del maíz, ya que al final de la primera etapa de establecimiento del cultivo de maíz (3-4 hojas), excedía la cantidad total disponible en un 15%. Sin embargo, T2 ajustó la superficie sembrada para tratar de concentrar el déficit hídrico principalmente en la etapa de crecimiento vegetativo, permitiendo así un uso más eficiente del agua disponible y asegurando cubrir las necesidades hídricas durante el resto del ciclo del cultivo.

4.2. Rendimientos y rentabilidad.

Según los resultados obtenidos para las tres campañas de ensayo (**Tabla 1; 2**), en dos de las tres, el manejo propuesto por la metodología ORDILS ha sido más rentable que el manejo tradicional en escenarios con volúmenes de agua limitada, ya que ha sido capaz de ajustar de forma dinámica tanto la superficie cultivable hasta el momento de la siembra, como el calendario de riegos aplicado de acuerdo con las condiciones reales climáticas acontecidas. Para el volumen de agua disponible (4.000 m^3 ha^{-1}), la rentabilidad media ha sido aproximadamente un 1,87% superior para el manejo propuesto por ORDILS, un valor inferior al obtenido en otros estudios similares [7]. Esta escasa diferencia de rentabilidad media se debió al manejo y precios de venta de las cosechas de cebada y maíz, que fueron muy distintos a la media de los últimos años, principalmente en la campaña de 2023 y, en parte, en 2022, viéndose por ello muy favorecido T1 por su distribución de estos cultivos durante esas campañas.

Los cultivos de cebada y maíz, tal y como se planteó este trabajo, son susceptibles de aplicarles riego deficitario con ORDILS, y, por tanto, a sufrir efectos sobre el rendimiento final. En el caso de la cebada, el rendimiento de T2 fue menor que el de T1 durante las tres campañas ya que T1 lo manejó siempre bajo condiciones de no déficit hídrico (**Tabla 1**). Los rendimientos correspondientes a T1 son similares a los obtenidos en otros estudios realizados con la misma variedad y en una zona similar [8]. En cuanto a T2, los resultados son ligeramente superiores a los de otros estudios en la misma zona con las variedades "Shakira" y "Scarlett" bajo niveles de déficit similares [7,9]. Del mismo modo, en el caso del cultivo de maíz, los mayores rendimientos han sido alcanzados por T1 (**Tabla 1**), ya que al igual que en el caso de la cebada, no sufrió estrés hídrico en ninguna campaña bajo ese manejo. Aun así, los rendimientos logrados por T1 son ligeramente inferiores a los obtenidos en otros estudios con las variedades "LG 30.681" [7] y "Dracma" y "Brasco" [3] bajo condiciones no deficitarias en la misma zona de estudio. Por otro lado, los rendimientos de T2 en las campañas 2022 y 2024 han estado dentro del rango de los valores obtenidos en esos mismos estudios bajo condiciones de déficit hídrico similares. En la campaña de 2023, la diferencia de rendimiento respecto a T1 fue muy acusada (una reducción del 35%) para el nivel de déficit al que fue sometido (7% global). Este descenso se justifica por las condiciones climáticas desfavorables y el déficit hídrico acontecido durante el periodo inicial de llenado del grano, donde los efectos negativos son mayores, tal y como apuntan [10], los cuales obtuvieron mermas de rendimiento similares a las del presente ensayo aplicando déficit hídrico durante dicha etapa.

Es por ello por lo que, para paliar los efectos de una variabilidad anormal de los precios de venta y del descenso de rendimientos de los cultivos por déficit hídrico durante etapas muy sensibles, el algoritmo de ORDILS fue modificado en la campaña 2024, observándose, al final de dicha campaña, una notable mejora de rentabilidad (12%) comparada con el manejo tradicional. No obstante, si los precios reales de venta de los cultivos de cebada y maíz durante 2022 y 2023 hubiesen sido similares a los precios medios históricos empleados por la metodología para determinar, tanto la distribución óptima de cultivos, como el nivel de estrés hídrico, la mejora de la rentabilidad media para las 3 campañas se hubiese situado en torno al 12% (**Tabla 2**), siendo este valor superior al obtenido por [7] con metodologías de optimización similares en la zona.

4.3. Productividad del agua de riego.

Tal y como muestran los resultados obtenidos (**Tabla 2**), la aplicación de la metodología ORDILS permite aumentar la productividad del agua de riego gracias al uso de técnicas de riego deficitario optimizadas y de calendarios de riego

eficientes en aquellos cultivos que se manejan bajo condiciones no deficitarias. En el caso del cultivo del ajo, ORDILS es capaz de obtener un rendimiento similar aplicando una menor cantidad de agua (**Tabla 1**), lo que incrementa de media un 17% la productividad agronómica del agua de riego. Estos resultados son similares a los obtenidos en un reciente estudio realizado en la zona [6]. Del mismo modo, en cebada, la productividad agronómica también mejora alrededor de un 13% de media para las tres campañas, aumentando entre 0,17 kg m^{-3} (2022) y 0,46 kg m^{-3} (2024). Estos valores son similares a los obtenidos por [9,11] en un estudio llevado a cabo también en condiciones de déficit hídrico con las variedades "Shakira" y "Scarlett" en la zona. Por último, en el caso del cultivo de maíz, exceptuando los valores de productividad de la campaña 2023, el manejo de ORDILS ha sido más eficiente que el tradicional, con mejoras de 0,24 kg m^{-3} (2022) y 0,33 kg m^{-3} (2024), siendo estos valores ligeramente superiores a los obtenidos en otros estudios en la zona [7].

5. Conclusiones

Los resultados de este ensayo ponen de manifiesto que el uso de técnicas de riego deficitario en explotaciones reales mejoraría la productividad del agua de riego, lo que se traduciría en un menor impacto ambiental y una mayor rentabilidad de esta actividad. La disponibilidad de agua, las condiciones climáticas, los precios de venta de la cosecha y los costes de cultivo son los principales factores que influyen en la diferencia entre la rentabilidad de una explotación gestionada con o sin técnicas de riego deficitario.

ORDILS ha demostrado una mayor eficiencia en el uso del agua y una rentabilidad competitiva frente al manejo tradicional, ya que es capaz de compensar los menores rendimientos de estrategias de riego deficitarias con una mayor superficie cultivada ajustándose al agua disponible. Del mismo modo, se ha demostrado que permite aumentar la productividad tanto agronómica como económica del agua de riego. Por tanto, esto la posiciona como una estrategia viable y sostenible para optimizar la rentabilidad y gestión del agua, especialmente en escenarios de escasez de recursos hídricos. No obstante, con el objetivo de reforzar los buenos resultados obtenidos durante la campaña de 2024, fruto del ajuste del algoritmo, se prevé un nuevo ensayo durante 2025.

Funding: Este trabajo ha sido financiado por la "Agencia Estatal de Investigación", cofinanciado con fondos FEDER y PRIMA, en el marco del proyecto ORDILS "PID 2020-120347RB-100" y SUPROMED "GA 1813" respectivamente.

Institutional Review Board Statement: No aplicable.

Informed Consent Statement: No aplicable.

Data Availability Statement: Los datos presentados en este estudio están disponibles previa solicitud al autor correspondiente.

Acknowledgments: Los autores agradecen el apoyo de la Agencia Estatal de Investigación (España), junto con los fondos FEDER, a lo largo del proyecto "ORDILS" (PID 2020-120347RB-100). Los autores agradecen el apoyo de la Comisión Europea y del programa PRIMA con el proyecto «SUPROMED» (número de subvención: 1813).

Conflicts of Interest: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

References

1. Ortega Álvarez, J.F.; De Juan Valero, J.A.; Tarjuelo Martín-Benito, J.M.; López Mata, E. MOPECO: An Economic Optimization Model for Irrigation Water Management. *Irrig Sci* **2004**, *23*, 61–75, doi:10.1007/s00271-004-0094-x.
2. Papadakis, J.S. Climates of the World and Their Agricultural Potentialities.; Buenos Aires, 1966.
3. Domínguez, A.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; Martínez, R.S.; Martínez-Romero, A. Determination of Optimal Regulated Deficit Irrigation Strategies for Maize in a Semi-Arid Environment. *Agric Water Manag* **2012**, *110*, 67–77, doi:10.1016/j.agwat.2012.04.002.
4. Leite, K.N.; Martínez-Romero, A.; Tarjuelo, J.M.; Domínguez, A. Distribution of Limited Irrigation Water Based on Optimized Regulated Deficit Irrigation and Typical Metheorological Year Concepts. *Agric Water Manag* **2015**, *148*, 164–176, doi:10.1016/j.agwat.2014.10.002.
5. Domínguez, A.; Martínez-Romero, A.; Leite, K.N.; Tarjuelo, J.M.; de Juan, J.A.; López-Urrea, R. Combination of Typical Meteorological Year with Regulated Deficit Irrigation to Improve the Profitability of Garlic Growing in Central Spain. *Agric Water Manag* **2013**, *130*, 154–167, doi:10.1016/j.agwat.2013.08.024.
6. Martínez-López, J.A.; López-Urrea, R.; Martínez-Romero, Á.; Pardo, J.J.; Montoya, F.; Domínguez, A. Improving the Sustainability and Profitability of Oat and Garlic Crops in a Mediterranean Agro-Ecosystem under Water-Scarce Conditions. *Agronomy* **2022**, *12*, doi:10.3390/agronomy12081950.
7. Domínguez, A.; Martínez-Navarro, A.; López-Mata, E.; Tarjuelo, J.M.; Martínez-Romero, A. Real Farm Management Depending on the Available Volume of Irrigation Water (Part I): Financial Analysis. *Agric Water Manag* **2017**, *192*, 71–84, doi:10.1016/j.agwat.2017.06.022.
8. Martínez-López, J.A.; López-Urrea, R.; Martínez-Romero, Á.; Pardo, J.J.; Montero, J.; Domínguez, A. Sustainable Production of Barley in a Water-Scarce Mediterranean Agroecosystem. *Agronomy* **2022**, *12*, doi:10.3390/agronomy12061358.
9. Pardo, J.J.; Martínez-Romero, A.; Léllis, B.C.; Tarjuelo, J.M.; Domínguez, A. Effect of the Optimized Regulated Deficit Irrigation Methodology on Water Use in Barley under Semiarid Conditions. *Agric Water Manag* **2020**, *228*, doi:10.1016/j.agwat.2019.105925.
10. NeSmith, D.S.; Ritchie, J.T. Maize (Zea Mays L.) Response to a Severe Soil Water-Deficit during Grain-Filling. *Field Crops Res* **1992**, *29*, 23–35, doi:10.1016/0378-4290(92)90073-I.
11. Martínez-Romero, A.; Martínez-Navarro, A.; Pardo, J.J.; Montoya, F.; Domínguez, A. Real Farm Management Depending on the Available Volume of Irrigation Water (Part II): Analysis of Crop Parameters and Harvest Quality. *Agric Water Manag* **2017**, *192*, 58–70, doi:10.1016/j.agwat.2017.06.021.

Desarrollo del gemelo digital de un pivote de riego en una plataforma SIG

Carmen Flores[1], Guillermo S. García, Rafael González[1], Emilio Camacho[1] y Pilar Montesinos[1]

[1] Universidad de Córdoba, Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica y Riegos; g02flcac@uco.es

* Correspondencia: g02flcac@uco.es

Resumen: La aparición de nuevas tecnologías en el sector agrícola ha impulsado la evolución de los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SSD) hacia plataformas inteligentes que conectan el mundo virtual con el mundo físico, para la optimización de los diferentes insumos de esta actividad, incluido el regadío. Este paradigma es la base de los Gemelos Digitales (GD). En este trabajo se ha desarrollado e implementado un GD de un sistema de riego mediante pivote, en una parcela de riego de maíz en el sur de Francia, para mejorar el proceso de toma de decisiones en cuanto a la programación del riego, aumentando la eficiencia del uso del agua y la energía. El GD se ha desarrollado sobre un sistema de información geográfica (SIG) dado el carácter espacial de la aplicación de agua con máquinas de riego. Debido a su operatividad y ser de acceso libre, la plataforma SIG elegida ha sido QGIS (Quantum GIS). El plugin facilita la creación, simulación y análisis del funcionamiento hidráulico del pivote

mediante el software Epanet y bajo múltiples escenarios (escasez hídrica, variabilidad climática, cambios de cultivo, estrategia de riego, etc). Así mismo permite la visualización de datos en tiempo real de sensores instalados y la generación de informes sobre los análisis realizados en el sistema de riego facilitando así el proceso de toma de decisiones en la programación del riego con pivote. Mediante el plugin desarrollado se ha generado y aplicado el GD a una parcela de riego de maíz en el sur de Francia.

Keywords: Agricultura de precisión, gestión eficiente del agua, sistema de apoyo a la decisión, implementación sensores Iot.

1. Introducción

El uso eficiente de los recursos hídricos a escala global es un aspecto fundamental en la sostenibilidad de la agricultura, ya que la disponibilidad y gestión del agua determinan en gran medida la productividad de los sistemas agrícolas [1]. En muchas regiones, el cambio climático ha intensificado la incertidumbre sobre la disponibilidad de agua, lo que hace que la gestión hídrica se convierta en un desafío aún mayor para la agricultura de regadío [2]. Además, el crecimiento de la población mundial y el aumento de la demanda de alimentos exigen una agricultura más productiva y eficiente en el uso de recursos.

En este contexto, la aplicación de tecnologías digitales en la agricultura de regadío ha adquirido una relevancia creciente [3]. Los sistemas de información geográfica (SIG), la modelización hidráulica y de cultivos, así como el uso de sensores y su implementación en sistemas de comunicación basados en el Internet de las cosas (IoT), permiten monitorizar y gestionar de manera más eficiente el manejo del agua de riego; facilitando la adaptación de los sistemas agrícolas a condiciones climáticas variables y cambiantes y situaciones de escasez de agua todo en un entorno de crisis climática [4].

Entre los sistemas de soporte a la toma de decisiones (SSD) avanzados, los gemelos digitales (GD) han emergido como una tecnología innovadora con el potencial de transformar la agricultura de regadío. Inicialmente desarrollados en el sector industrial, los GD han comenzado a ser implementados en el ámbito del riego para reproducir digitalmente sistemas agrícolas [5]. La esencia de un gemelo digital radica en ser la representación virtual de un sistema físico real, con el cual mantiene una comunicación en tiempo real mediante sensores, que monitorizan las variables clave, para simular diversos escenarios de operación para su posterior análisis y toma de decisiones [6].

En los últimos años, la mejora y abaratamiento de los sistemas de monitorización y de comunicación de la información ha impulsado, entre otros factores, el desarrollo de GD aplicados al sector agrario [7] [8] [9] [10] [11]. Aún, así los trabajos específicos sobre GD de los sistemas de riego siguen siendo limitados.

El objetivo de este trabajo, enmarcado dentro del proyecto SUDOE Smart Green Water, es el desarrollo de una herramienta para la generación, simulación y análisis de gemelos digitales en máquinas de riego tipo pivote, como complemento (plugin) del software QGIS (Quantum GIS) [12]; adaptable a configuraciones diversas de dicho sistema de riego y distintos cultivos herbáceos. La herramienta desarrollada se ha aplicado en la generación del gemelo digital de un pivote real, que opera en una de las parcelas piloto del proyecto.

2. Materiales y métodos

La herramienta desarrollada, “RIAB” (Riego inteligente mediante Inteligencia Artificial y Bigdata), es un plugin para el sistema de información geográfica QGIS, que ha sido desarrollado con lenguaje de programación Python. La elección del programa QGIS como entorno de trabajo se debe al marcado carácter geoespacial de los sistemas de riego. Las condiciones de trabajo de un sistema de riego dependen, entre otros factores, de la orografía, su elevación, así como el diseño y la configuración espacial de la máquina de riego. QGIS al ser un sistema de

información geográfica (SIG) permite integrar capas de información geoespacial y asociarlas a sensores, tipos de suelo, datos climáticos, red de riego, topografía, etc... lo que lo convierte en un entorno idóneo para la generación, simulación y evaluación de gemelos digitales (GD).

La herramienta RIAB es un DSS (Decision Support System) de última generación en gestión de riego. Integra la modelización, simulación y conexión en tiempo real con el exterior, así como el análisis para proporcionar la mejor información disponible que permita optimizar el proceso de toma de decisiones en cuanto al manejo del riego

2.1. Arquitectura del plugin RIAB.

La herramienta RIAB, desarrollada como extensión (plugin) para QGIS unifica la creación e implementación de la parte digital del gemelo, la incorporación de datos climáticos y la conexión automática con datos de los sensores instalados en la parcela y máquina de riego reales.

Un GD es una representación virtual de un sistema, producto o proceso físico que se actualiza en tiempo real con datos del mundo real. En el caso de un GD de una parcela de riego la parte física está compuesta por todos los elementos reales del entorno de riego (cultivo, suelo, clima y sistema de riego) y todos los sensores, fuentes de datos y sistemas de comunicación que permiten la conexión al entorno físico. La conexión con el entorno físico junto con cierta información de entrada sobre el tipo de cultivo y las características del sistema de riego del pivote, permiten al plugin generar el modelo hidráulico (modelo digital) del sistema de riego y simular su comportamiento mediante el simulador hidráulico Epanet [13], software de acceso libre.

Para la conexión con la parte física, RIAB implementa una librería propia para conectar en tiempo real el gemelo digital con de los sensores instalados en campo (en el suelo y el sistema de riego) y los datos climáticos. La parte de la librería encargada de la conexión con los sensores instalados en la finca de estudio se ha encapsula las diferentes APIs comerciales propias de estos sensores, para ofrecer diversas posibilidades de visualización y gestión de la información en tiempo real desde el entorno de QGIS y su inclusión en el proceso de toma de decisiones. Del mismo modo y dado que las variables agroclimáticas son esenciales para obtener una programación de riego fiable y precisa; RIAB también permite incorporar diferentes APIs de distintos proveedores de datos climáticos (históricos y predictivos) para España, y a nivel mundial, mediante la posición geográfica de la

instalación de riego. De esta manera es posible obtener datos como la precipitación, la evapotranspiración de referencia, humedad del ambiente o temperatura.

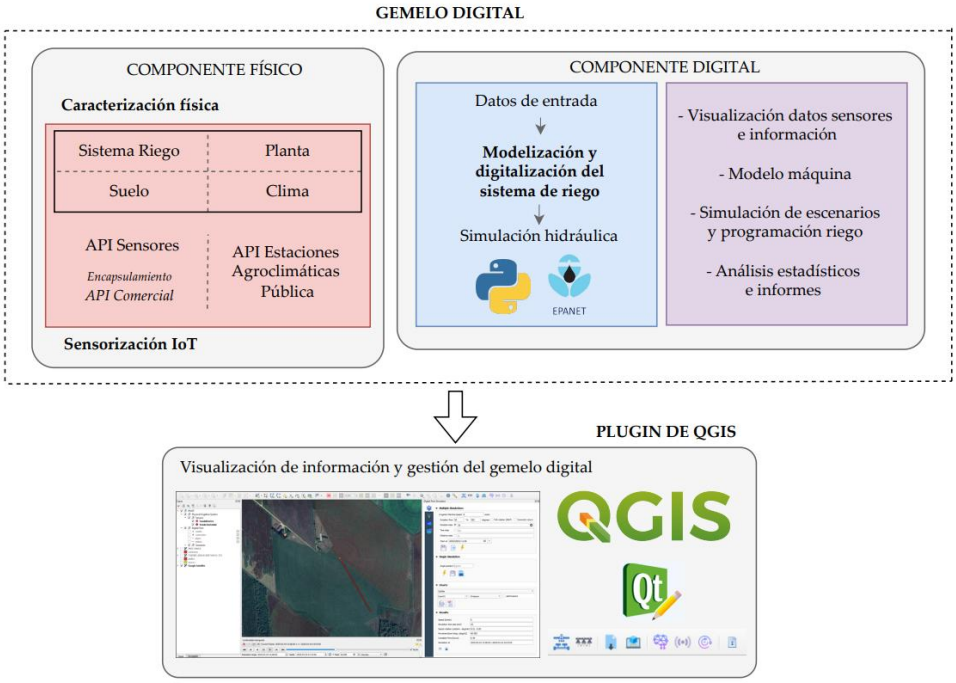


Figura 1. Esquema de la arquitectura del plugin RIAB

Mediante la introducción de un conjunto de datos de entrada (longitud del pivote, número de vanos, tipo de emisores, etc) que caracterizan el sistema de riego, RIAB genera automáticamente el modelo hidráulico del pivote. Desde la vista de mapa de QGIS, el usuario puede visualizar la posición geográfica de la instalación de riego, los sensores y la posición de las estaciones agroclimáticas más cercanas. Además, no solo se limita a representar la infraestructura del riego, sino que permite simular el comportamiento hidráulico del sistema ante distintas condiciones, simulando y visualizando así su movimiento.

El análisis hidráulico que ofrece el plugin se extiende a una evaluación detallada del reparto de presiones y caudales en la red de riego, lo que proporciona datos clave para la gestión y modificación del sistema. En el caso del sistema de riego pivote, que está compuesto por múltiples emisores distribuidos a lo largo de la tubería de cada tramo, la modelización permite observar cómo varían las presiones y los caudales según la distancia a la torre de tramo. Este comportamiento es fundamental para ajustar el funcionamiento del sistema, ya que las presiones disminuyen a medida que se aleja el agua de la toma de agua. Estos datos, ofrecen una visión clara de las variaciones hidráulicas en el sistema, lo cual es de gran ayuda para los agricultores al momento de realizar modificaciones o ajustes operativos.

Para potenciar la utilidad del gemelo digital, se han desarrollado una serie de aplicaciones adicionales mediante el lenguaje de programación Python. Estas aplicaciones se han diseñado para mejorar la interacción del usuario con el sistema y proporcionar herramientas avanzadas que faciliten la toma de decisiones en la gestión de riego agrícola. Todas estas funciones se han introducido en la interfaz gráfica de QGIS, accediendo a ellas a través de unos menús y ventanas mostradas en una interfaz sencilla e intuitiva para el usuario.

2.2. Entorno de trabajo RIAB

Al instalar el plugin RIAB se activa una serie de accesos directos a las funciones principales del plugin. En la Figura 2, puede verse el menú principal de la herramienta creada.

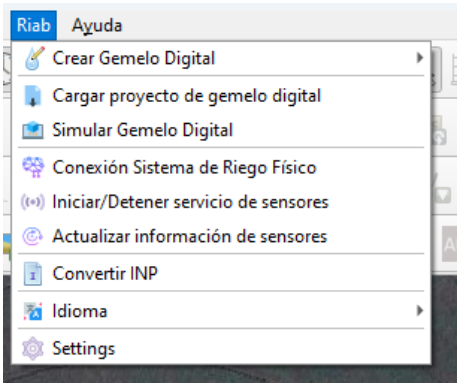


Figura 2. Menú principal del plugin RIAB

Para la creación de un nuevo gemelo digital, es necesario introducir una serie de datos para caracterizar el sistema de riego. Accediendo a la función “Crear Gemelo Digital”, aparece una ventana emergente en la que deben introducirse los datos para la caracterización. Entre estos datos se encuentran parámetros básicos como el tipo de máquina, la altimetría de la parcela (caracterizada a partir del Modelo Digital del Terreno, MDT), la posición fija del pivote, la presión en el hidrante a la entrada de dicha torre y la altura de la misma. Por último, se debe introducir información para caracterizar cada uno de los tramos del pivote. La información que es necesario aportar para cada uno de los tramos/vanos del pivote se muestra en la Figura 3.

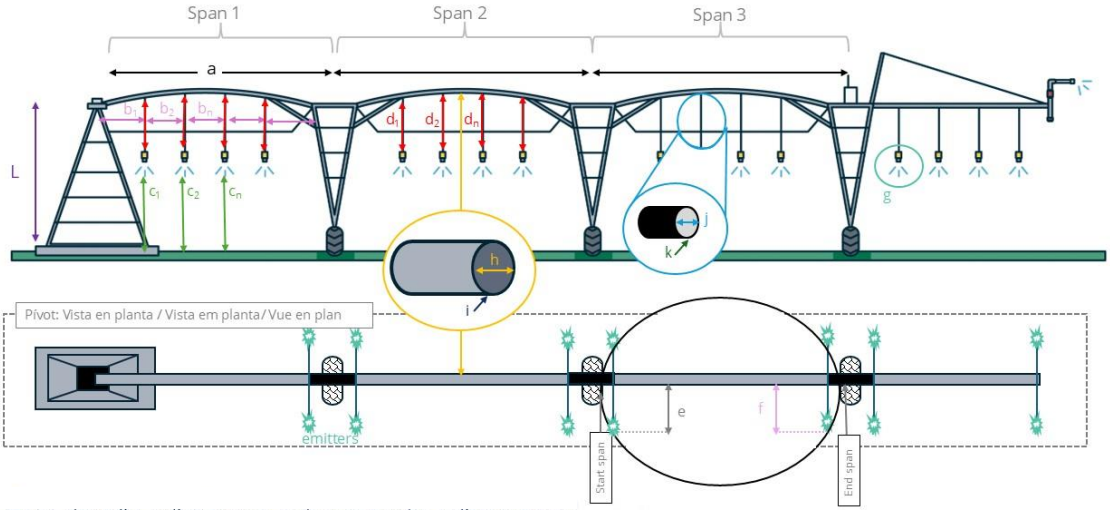


Figura 3. Información necesaria para la caracterización de un pivote de riego. a) longitud del vano, b) distancia entre emisores, c) altura del emisor respecto a la superficie del suelo, d) longitud de la tubería flexible/colgante, e) distancia/desfase entre el emisor de la torre y la tubería principal en el inicio del vano. f) distancia/desfase entre el emisor de la torre y la tubería principal al final del vano, g) coeficiente de descarga del gotero, h) diámetro interior de la tubería principal, i) rugosidad del material de la tubería principal, j) diámetro interior de las tuberías colgantes, k) rugosidad de las tuberías colgantes

Una vez creado o cargado el gemelo digital de interés para el usuario este se mostrará en el mapa de visualización de QGIS con una estructura específica de las capas. Así, se mostrará un grupo principal con el nombre del gemelo digital creado. Por otro lado, se muestra una subcapa con el sistema de riego real, capa que representa la conexión con el elemento físico real principalmente mediante sensores. Este contendrá la ubicación de cada uno de los sensores o estaciones agroclimáticas. La otra subcapa que se podrá visualizar será la del gemelo digital, en la cual se mostrará la representación digital de cada uno de los componentes del sistema de riego (tuberías, emisores, válvulas e hidrantes) y además en la capa digital aparecerán los escenarios simulados. Dentro de la capa de cada simulación es posible acceder a la información y condiciones hidráulicas en la que se encuentra cada uno de los elementos de la red de riego bajo dicho escenario.

También se encuentran en este menú principal de la barra de herramientas otras funciones relacionadas con el manejo de datos de los sensores. Así, se dispone de la función de establecer una conexión con el sistema de riego físico, a través de la red de sensores instalados. Esto es posible gracias a la introducción de diversos parámetros clave de cada uno de los sensores, como pueden ser el código de identificación (ID) del sensor o el ID de la métrica que se quiere obtener. Del mismo modo se puede iniciar o detener el servicio de los sensores para interrumpir o reactivar la conexión, o actualizar la información con el objetivo de visualizar los datos más recientes.

Por otro lado, una vez que se han introducido los datos más específicos del pivote es posible realizar la simulación del gemelo digital. Únicamente pulsando sobre esta función se activa una nueva ventana de operación donde se puede navegar por el resto de los parámetros, resultados y configuraciones relacionadas con la simulación. Esta sección de simulación del gemelo digital se divide por secciones. Además de la simulación hidráulica se encuentra otras secciones como la de riego o visualización de los datos de los sensores. En la sección de simulación hidráulica el usuario podrá generar y simular todos los escenarios que desee evaluar en cuanto al sistema de riego de la máquina seleccionada. Además de los parámetros del sistema de riego que se pueden variar (por ejemplo, la velocidad de avance de la máquina), también es posible visualizar las figuras y resultados relacionadas con el modelo hidráulico del sistema. Todas estas figuras y resultados tienen la posibilidad de ser exportados en formato de imagen, *.pdf o *.html.

Por último, el submenú que se encuentra a continuación dentro de este menú de simulación permite la visualización de los datos de los sensores. En este, el usuario, puede conectar con los sensores propios instalados en la finca y con la estación meteorológica pública seleccionada. Los datos climáticos pueden consultarse de forma gráfica para un intervalo de tiempo seleccionado (por ejemplo, el año hidrológico 2022-2023), y elaborar de forma automática, un análisis avanzado de cualquier serie temporal de las variables climáticas disponibles.

3. Aplicación

Se ha aplicado RIAB a la implementación del gemelo digital de un pivote de riego situado en la población de Solférino (Nueva Aquitania). A continuación, se muestra la descripción del sistema real (parcela de cultivo, pivote y sensores) y el análisis de los resultados de las simulaciones realizadas con RIAB.

3.1. Caso de estudio.

La zona de estudio seleccionada para la aplicación de la herramienta es una parcela dedicada al cultivo de maíz, que se riega mediante un pivote. La ubicación geográfica de la parcela piloto es determinante para las condiciones climáticas y edafológicas que afectan al sistema de riego.

El sistema de riego de la finca, a partir del cual se ha desarrollado el gemelo digital, consiste en un pivote de riego que opera con una presión total de 5 bares en la toma de agua. El caudal suministrado por el sistema es de 170 m^3/h, distribuido a través de tuberías de PVC con un diámetro de 160 mm. La superficie regada es de 55 ha.

Desde el punto de vista edafológico, los suelos de la región de Landas se caracterizan por su composición predominantemente arenosa, con una baja capacidad de retención de agua y un buen drenaje. Estas condiciones edáficas influyen en la estrategia de riego, ya que requieren una gestión eficiente para evitar pérdidas por percolación y garantizar una distribución homogénea del recurso hídrico.

En términos climáticos, la región presenta un clima templado oceánico, con inviernos suaves y veranos moderadamente cálidos. Las temperaturas medias en invierno oscilan entre los 5 y 10 °C, mientras que en verano se sitúan en un rango de 20 a 25 °C. Las precipitaciones anuales superan en ocasiones los 900 mm y están distribuidas de manera relativamente uniforme a lo largo del año. Sin embargo, los meses de octubre y noviembre registran los mayores volúmenes de lluvia, lo que influye directamente en la planificación del riego. Durante estos periodos de alta pluviometría, la necesidad de riego se reduce, mientras que, en los meses de menor precipitación, como julio y agosto, se requiere un mayor aporte hídrico para mantener el desarrollo óptimo del cultivo de maíz, que se siembra a mediados de abril y se recoge a mediados de octubre.

La evapotranspiración de referencia de la zona (ETo), parámetro esencial en la gestión del riego, varía entre los 3 y 5 mm/día. Los datos de precipitación, temperatura o ETo se toman de OpenMeteo.

Para la conexión del sistema físico y digital del gemelo, la parcela piloto se ha provisto de un punto de monitorización de humedad de suelo con 3 sensores capacitivos (teros11) a distintas profundidades y 3 sensores de presión dispuestos sobre el pivote con el objetivo de monitorizar la distribución de la presión en el sistema y proporcionar la información necesaria al GD.

3.2. Simulación del pivote

En la Figura 4 se puede observar cómo una vez creado el pivote de riego a partir de la información que se detallaba en el punto 2.2, se visualiza la máquina de forma gráfica en la pantalla de trabajo de QGIS sobre la ortofoto de la parcela. Se observa que es posible ubicar los gráficos con resultados de las consultas realizadas en el mismo sistema de información geográfica., mostrando la utilidad de QGIS como plataforma de integración de los distintos componentes del GD.

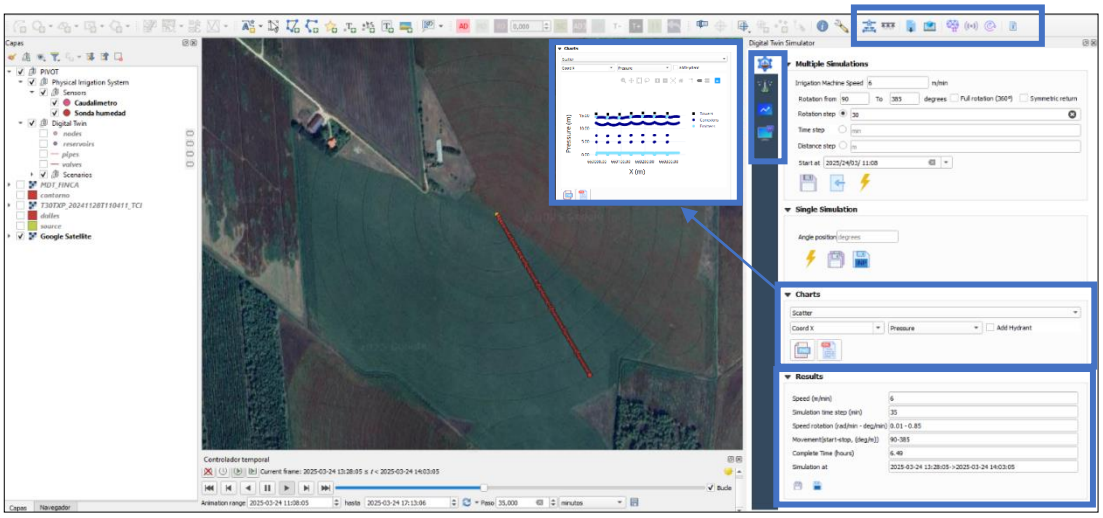


Figura 4. Interfaz gráfica de RIAB

Desde la opción de "Simular Gemelo Digital" del menú principal es posible realizar una simulación del pivote a distintas velocidades. Así se ha introducido a modo de ejemplo 6 m/min obteniendo una simulación hidráulica de la máquina de riego con los resultados mostrados en la figura 5. Así es posible visualizar, analizar y estudiar diversos parámetros de interés en distintos puntos del pivote y en distintos momentos en función de la posición de avance en la que se encuentre el pívot. Tal y como se observa en la sección 'Charts' del panel. Alguno de estas variables son la presión y caudal en cada punto del pivote, pérdidas de energía, línea geométrica, piezométrica y de energía, etc.. Por último, se visualizan una serie de resultados de interés para el usuario, como que el tiempo de recorrido hasta completar el giro es de 6,49 horas.

En la Figura 5 se puede observar un ejemplo práctico de esta aplicación. En este caso se ha realizado una consulta sobre la distribución de presiones en el pivote tras una simulación. Se puede observar como aquellos emisores o aspersores en este caso que se encuentran desplazados por una tubería más larga en la zona de pasada de las ruedas, entre vanos, de la máquina de riego, tiene unas presiones más bajas, en torno a los 12 m.

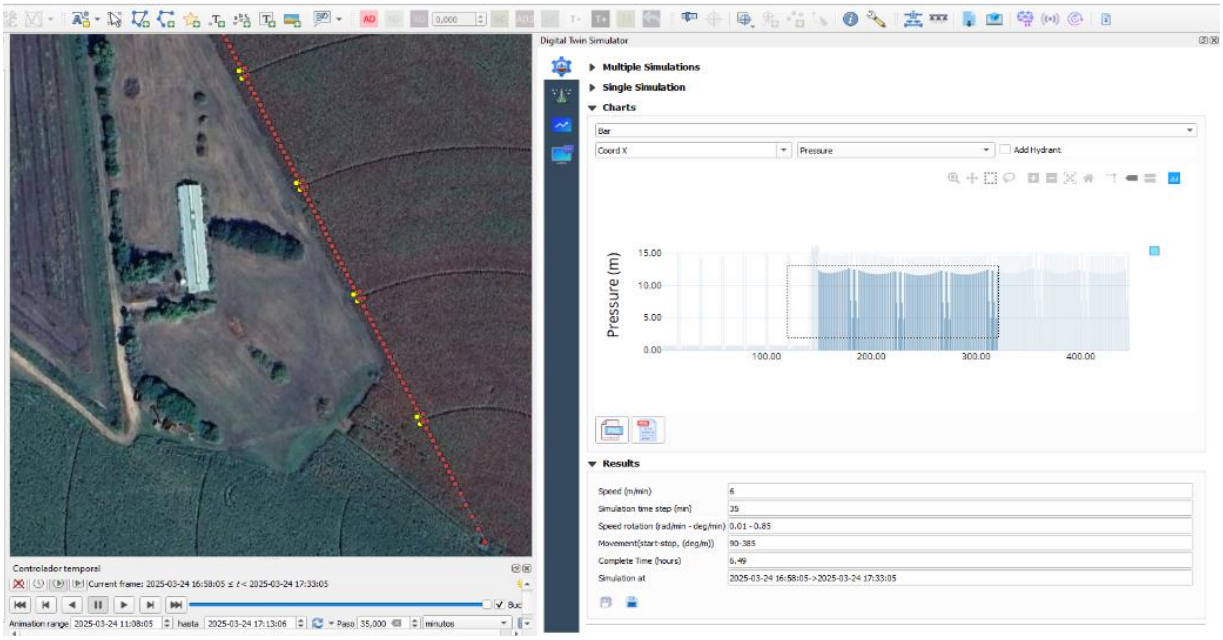


Figura 5. Consulta de presiones del pivote de riego mediante el uso de la herramienta RIAB.

RIAB también permite visualizar las gráficas de evolución de humedad del suelo o del caudal de riego, tal y como se muestra en la Figura 6, o añadiéndose a la propia interfaz gráfica espacial. Todos estos datos se pueden visualizar en tiempo real, y la frecuencia de actualización de los mismos es establecida por el usuario en el momento de vincular los sensores al proyecto del gemelo.

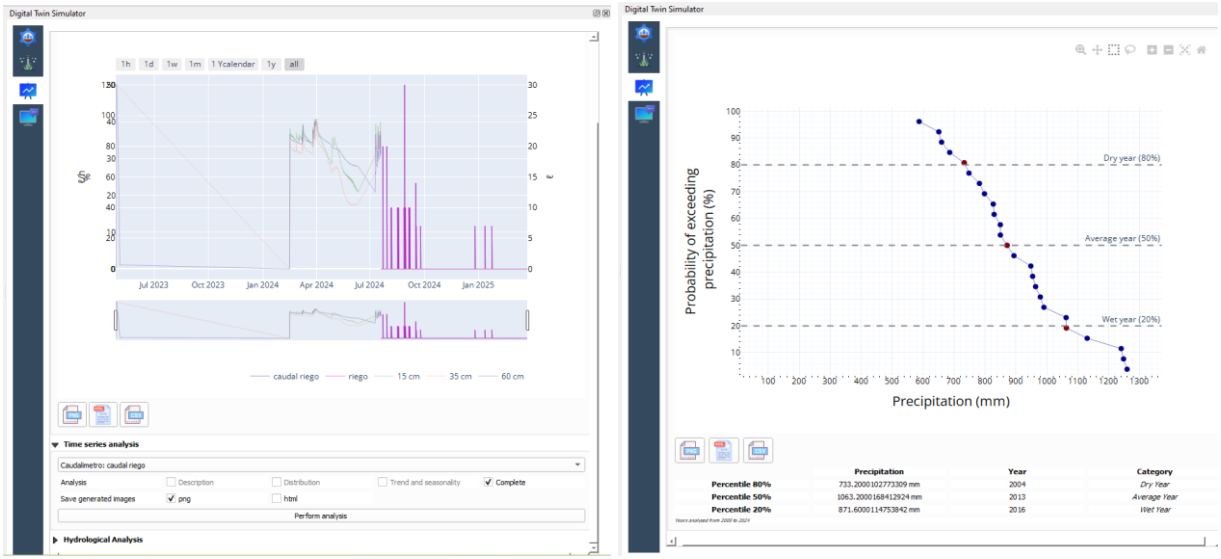


Figura 6. Visualización de los sensores propios y estaciones meteorológicas públicas. a) Humedad suelo y caudal. b) Análisis de los datos de precipitación.

Así en la figura 6a se muestra una gráfica con los valores registrados por los sensores de humedad del suelo instalados en la parcela junto con el registro de eventos de riego. En la figura 6b se muestra un ejemplo de los posibles análisis que puede realizar RIAB. En este caso se presenta el análisis de la serie de datos de pluviometría de la red de información meteorológica OpenMeteo recabados por

RIAB para la localidad de la parcela piloto. Este análisis ayuda a comprender la distribución de la precipitación anual y su variabilidad. Permite categorizar los años en función de su precipitación y evaluar la frecuencia de eventos secos o húmedos, lo que es útil para la planificación de campañas de riego en base a la pluviometría de los últimos años.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una herramienta para la generar y aplicar gemelos digitales de sistemas de riego por pivote. La herramienta, denominada RIAB, es un plugin o complemento del sistema de información geográfica QGIS. RIAB genera de forma automática el modelo hidráulico del pivote a partir de información básica del mismo que proporciona el usuario, que además proporcionará datos de la parcela de riego real (suelo, cultivo) que se complementa con la información recogida en tiempo real mediante sensores locales (de suelo y de presión en el pivote) con comunicación IoT y externos (redes públicas de datos climáticos). Esta información alimenta el gemelo digital cuyo componente principal, el modelo hidráulico, puede reproducir virtualmente múltiples escenarios de funcionamiento del pivote real, al que está vinculado mediante la red de sensores, sin necesidad de que ocurran en la realidad. Como SSD, RIAB es una herramienta para la gestión óptima del riego con pivotes basada en decisiones informadas, que facilita la implementación de riegos de precisión para mejorar la sostenibilidad de las explotaciones regadío con el uso de herramientas digitales.

Acknowledgments: Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto SMART GREEN WATER, desarrollado dentro del programa Interreg Sudoe y financiado con fondos europeos. Agradecemos el apoyo recibido, que ha hecho posible el desarrollo de esta investigación.

5. Referencias

1. Ahmadi, B. V.; Moran, D.; Barnes, A. P.; Baret, P. V. Comparing decision-support systems in adopting sustainable intensification criteria. *Frontiers in Genetics* **2015**, *5*, FEB. https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00023
2. Smith, P., et al. "Global warming and its effects on water resources management in agriculture." Environmental Sustainability Journal, **2021**, 22(4), 181-193.
3. Alves, R. G.; Souza, G.; Maia, R. F.; Tran, A. L. H.; Kamienski, C.; Soininen, J. P.; Aquino, P. T.; Lima, F. A digital twin for smart farming. *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC* **2019**. https://doi.org/10.1109/GHTC46095.2019.9033075.
4. Clementi, M.; Dessì, V.; Podestà, G. M.; Chien, S. C.; Wei, B. A. T.; Lucchi, E. GIS-Based Digital Twin Model for Solar Radiation Mapping to Support Sustainable Urban Agriculture Design. *Sustainability (Switzerland)* **2024**. https://doi.org/10.3390/su16156590.
5. Zhang, L., et al. "Digital twins in precision agriculture: A review of applications, challenges, and opportunities." Journal of Agricultural Engineering, **2021**, 38(1), 24-37.
6. Ferrer, Y.; Casadesus, J.; Navas, J. F. Automatización del riego a través de gemelos digitales, una realidad. 2020.
7. Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access* **2020**, *8*, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358.
8. Marinchenko, T. E. Digitalization Of Agricultural Sector: Outlook In Russia. *Proceedings of the European Proceedings of Social and Behavioural Sciences* **2020**. https://doi.org/10.15405/epsbs.2020.10.03.131.

9. Shamia, D.; Suganyadevi, S.; Satheeswaran, V.; Balasamy, K. Digital twins in precision agriculture monitoring using artificial intelligence. *Digital Twin for Smart Manufacturing* **2023**. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99205-3.00004-3.
10. Tagarakis, A. C.; Benos, L.; Kyriakarakos, G.; Pearson, S.; Sørensen, C. G.; Bochtis, D. Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. *Sensors* **2024**, *24*(10). https://doi.org/10.3390/s24103117.
11. Bellvert, J.; Pelechá, A.; Pamies-Sans, M.; Virgili, J.; Casadesús, J. IrriDesk: an automatic irrigation decision support system which integrates crop modelling with sensors and remote sensing data. ISHS Acta Horticulturae, **2024**, 1409, 19. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1409.19
12. Team, Q.D. Quantum GIS. Available online: http://qgis.org (acceso 05/04/2025).
13. Rossman, L.A. Epanet 2 User's Manual. *Natl. Risk Manag. Res. Lab. USEPA* **2000**, *1*, 1–200. https://doi.org/10.1177/0306312708089715

Monitorização da qualidade da água em campos de produção de arroz (*Oryza sativa* L.) na Lezíria do Tejo

Ana Coelho Marques[1,2*], Manuela Simões[1,2], Inês C. Luís[1,2], Ana R. F. Coelho[1,2], Claúdia C. Pessoa[1,2], Diana Daccak[1,2], Paula Scotti-Campos[2,3], Ana S. Almeida[2,4], Maria M. Silva[1,2], Paulo Legoinha[1,2], Isabel P. Pais[2,3], José C. Ramalho[2,5], José N. Semedo[2,3], Lourenço Palha[6], Fernando H. Reboredo[1,2], Fernando C. Lidon[1,2]

1 Departmento de Ciências da Terra, NOVA School of Science and Technology (NOVA FCT), Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; (mmsr@fct.unl.pt; idc.rodrigues@campus.fct.unl.pt; arf.coelho@fct.unl.pt; c.pessoa@fct.unl.pt; mma.silva@fct.unl.pt; pal@fct.unl.pt; fhr@fct.unl.pt; fjl@fct.unl.pt)

2 Centro de Investigação GeoBioTec, NOVA School of Science and Technology (FCT NOVA), Caparica, Portugal

3 Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. (INIAV), Avenida da República, Quinta do Marquês, 2780-157 Oeiras, Portugal (paula.scotti@iniav.pt; isabel.pais@iniav.pt; jose.semedo@iniav.pt)

4 Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. (INIAV), Estrada de Gil Vaz 6, 7351-901 Elvas, Portugal (sofia.almeida@iniav.pt)

5 PlantStress & Biodiversity Lab., Centro de Estudos Florestais (CEF), Associate Laboratory TERRA, Instituto Superior Agronomia (ISA), Universidade de Lisboa (ULisboa), Quinta do Marquês, Av. República, 2784-505 Oeiras and Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal (cochichor@mail.telepac.pt)

6 Centro de Competências do Arroz (COTArroz), 2120-014 Salvaterra de Magos, Portugal (l.palha@cotarroz.pt)

*Autor correspondente: amc.marques@campus.fct.unl.pt

Resumo: A qualidade da água utilizada na produção de arroz (*Oryza sativa* L.) constitui um dos aspetos a integrar nas boas práticas agrícolas para garantir eficiência e sustentabilidade na utilização dos recursos e a obtenção de alimentos seguros. O estudo desenvolvido nos canteiros de arroz, da variedade Ceres, situados na Lezíria Ribatejana, em Salvaterra de Magos, na bacia do rio Tejo, em Portugal, teve por objetivo a monitorização, durante 2 anos consecutivos de produção, da composição físico-química da água de irrigação. Foi amostrada e analisada, em laboratório, a água de abastecimento aos canteiros e do alagamento. Com recurso a métodos eletroquímicos, fotométricos, potenciométricos e cromatografia iónica (HPLC) foram analisados e quantificados parâmetros físicos e químicos, como pH, condutividade elétrica (CE) e HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, Na^+, K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}. A fácies hidroquímica da água, baseada na classificação iónica de Piper, variou entre cloretada cálcica, cloretada bicarbonatada sódica, bicarbonatada, cloretada e bicarbonatada sulfatada, sódica e sódica cálcica, evoluindo a sua composição, desde a origem (furo de captação subterrânea) na concentração total de sais e na sua proporção relativa, tais como, de sulfato, bicarbonato, cálcio e sódio. O pH variou entre ligeiramente ácido (6,3 e 6,6) no primeiro ano e neutro a alcalino no segundo (7,1 e 8,1). A CE é típica de água medianamente mineralizada, com valores a oscilarem entre 420 e 800 µS/cm (no primeiro ano) e 675 e 1714 µS/cm (no segundo ano). De acordo com a classificação de Wilcox para uso agrícola, a água projeta-se nas classes C2S1, C3S1, C3S2 e C4S2, não representando perigo de sodização do solo, mas a possibilidade de precipitação de sais no solo. Em conclusão, os parâmetros de qualidade da água enquadram-se nos valores normativos para cultivo de arroz.

Palavras-chave: Arroz; Fácies hidroquímica; Gestão e Qualidade da água; *Oryza sativa* L.

1. Introdução

O arroz (*Oryza sativa* L.) é considerado como alimento básico para cerca de 2/3 da população mundial sendo considerado como a segunda cultura de cereais mais cultivada e consumida no mundo [1] estando dependente de um grande volume de água para o seu desenvolvimento [2, 3]. A utilização de água adequada no cultivo do arroz é essencial para garantir a sua qualidade, influenciando o rendimento bem como as características finais do grão. É cada vez mais importante adotar estratégias que garantam o uso responsável da água, promovam a produção agrícola sustentável e reforcem a segurança alimentar, especialmente num contexto de alterações climáticas [1].

Neste enquadramento, este estudo tem como objetivo a monitorização da qualidade da água utilizada no cultivo do arroz da variedade Ceres.

2. Materiais e Métodos

Foi efetuada a amostragem da água de abastecimento (furo de captação subterrânea), irrigação e alagamento nos canteiros localizados no Ribatejo (Salvaterra de Magos) onde se cultivou a variedade Ceres. Efetuaram-se amostragens em duas campanhas agrícolas que decorreram entre 04/06 e 23/09/2019 (primeiro ano) e 02/06 – 15/10/2020 (segundo ano).

Os parâmetros pH e condutividade elétrica (CE), ambos medidos a 20ºC, foram obtidos no analisador multiparamétrico (*Consort,* C 6030) com recurso aos elétrodos SP21 (pH) e SK20T (CE).

A quantificação do ião bicarbonato (HCO^-_3) foi efetuada por titulação ácido - base com recurso a 100 mL de amostra, 0,1N de ácido clorídrico como titulante e 0,1% de alaranjado de metilo de acordo com a metodologia descrita [5].

Recorreu-se à espetrofotometria em fotómetro (*Spectroquant* NOVA 60, *Merck*) e aos respetivos *kits* para quantificação dos aniões Cl^- (1.14897, *Merck*), SO_4^{2-} (1.14779, *Merck*) e PO_4^{3-} (1.14842, *Merck*).

Os catiões Ca^{2+}, Na^+, K^+ e Mg^{2+} foram quantificados por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) com recurso ao cromatógrafo Metrohm (Modelo 761, *Compact IC*) equipado com coluna analítica (*Thermo Ionpac* AS9-HC 250 x 4 mm), pré-coluna (*Metrosep Cation* 1-2, 6.1010.000), e detetor de condutividade (2.732.0010) sem supressão química (6.2620.150). Utilizou-se como eluente a mistura de ácido tartárico (4mM $C_4H_6O_6$) e de ácido dipicolínico (1 mM $C_7H_5NO_4$) com caudal de 1 mL min^{-1} e 10 µL de amostra [6].

A classificação da fácies hidroquímica das amostras foi efetuada com recurso ao Diagrama de Piper considerando os iões dominantes, utilizando o programa Grapher (https://www.goldensoftware.com/products/grapher/). O Diagrama de Wilcox foi obtido no mesmo programa considerando a CE e o índice de absorção de sódio (SAR). Este índice foi calculado de acordo com a equação 1:

$$\text{SAR (meq/L)} = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

3. Resultados

Os resultados da análise físico-química da água, no que respeita a pH e condutividade elétrica (CE), correspondentes aos diferentes anos de ensaio, são apresentados na **Tabela 1**. No primeiro ano de ensaio o pH das amostras foi de 6,30 (irrigação), 6,60 (alagamento) e 6,90 (abastecimento) enquanto a condutividade elétrica (CE) oscilou entre 376 $\mu S.cm^{-1}$ (abastecimento) e 800 $\mu S.cm^{-1}$ (alagamento).

No segundo ano de ensaio o pH da água de irrigação oscilou entre 7,11 e 7,80, comparando a segunda (2A) com a terceira amostragem (3A) (**Tabela 1**). A amostragem da água de alagamento revelou oscilações entre 7,20 - 7,54 (1A), 7,10 - 8,08 (2A) e 7,14 - 7,76 (3A), o que permite inferir que a água de alagamento não sofreu variações significativas de pH ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Por sua vez, o pH das amostras de abastecimento variou entre 7,14 (2A) e 7,49 (3A). Relativamente à CE, nas amostras de abastecimento, o valor foi de aproximadamente 300 $\mu S.cm^{-1}$ enquanto nas amostras de alagamento variou entre 766 – 1501 (1A), 959 - 1879 (2A) $\mu S.cm^{-1}$ e 1602 – 2250 $\mu S.cm^{-1}$ (3A). Nas amostras de água de irrigação a CE variou entre 675 – 1714 $\mu S.cm^{-1}$.

Tabela 1. Resultados da análise físico-química dos parâmetros pH e condutividade elétrica (CE) realizada no primeiro (A) e segundo (B) anos, na primeira (1A), segunda (2A) e terceira (3A) amostragens.

Identificação			pH	CE (µS.cm^{-1})
A		Irrigação	6,30	420
		Alagamento	6,60	800
		Abastecimento	6,90	376
B	1A	Irrigação	7,55	675
		Alagamento	7,47	1501
			7,40	1376
			7,38	1221
			7,54	1213
			7,48	1150
			7,40	1069
			7,20	1044
			7,30	766
		Abastecimento	7,39	339
	2A	Irrigação	7,11	712
		Alagamento	7,38	1679
			7,19	1753
			8,08	1819
			7,17	1429
			7,11	1318
			7,67	959
			7,26	1769
			7,10	1879
		Abastecimento	7,14	311
	3A	Irrigação	7,80	1714
		Alagamento	12,30	2150
			7,76	1602
			7,28	1981
			7,60	1995
			3,36	2370
			7,14	1167
			7,49	2250
			7,35	2400
		Abastecimento	7,49	311

Em relação aos iões dominantes, de acordo com a projeção triangular de Piper, a água de irrigação e de alagamento são de fáceis cloretada bicarbonatada sódica e a água de abastecimento é bicarbonatada cloretada sódica **(Figura 1)**. Desde a captação até à entrada do canteiro, a água pareceu sofrer evolução, enriqueceu em catiões (Ca^{2+}, Mg^{2+} e Na^{+}), perdeu K^{-}, diminuiu HCO_3^{-} e aumentou a concentração em Cl^{-}.

A aptidão da água para uso agrícola, de acordo com a classificação de Wilcox, que relaciona a condutividade elétrica (CE) com o Índice de Adsorção de Sódio (SAR), classifica-se nas classes C e S, respetivamente. As amostras pertencem às classes C2S1 (irrigação e abastecimento) e C3S1 (alagamento). Desde a captação até ao interior do canteiro, a mineralização da água aumentou significativamente. As amostras de abastecimento e alagamento são consideradas pouco mineralizadas com risco médio a elevado de alcalinização do solo e, de acordo com o Índice de Absorção de Sódio (SAR) apresentam baixo perigo de sodização do solo.

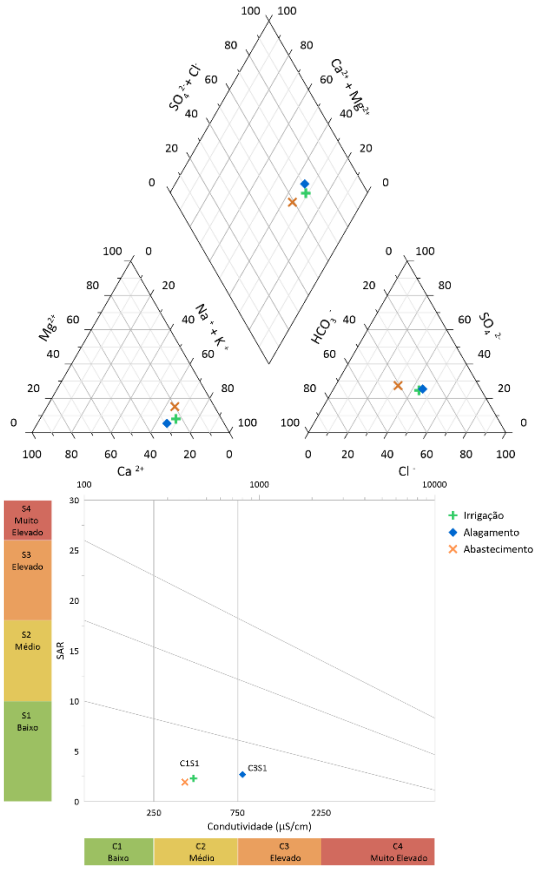


Figura 1. Projeção em diagrama triangular de Piper (esquerda) e Diagrama de Wilcox (direita) das amostras de água de irrigação, alagamento e abastecimento referentes aos canteiros onde foi cultivada a variedade Ceres no primeiro ano de ensaio.

No que respeita aos iões dominantes, de acordo com a projeção triangular de Piper, a água de irrigação é de fáceis bicarbonatada sulfatada sódica cálcica (1A), bicarbonatada cloretada sódica cálcica (2A) e cloretada cálcica (3A) **(Figura 2).** A água de alagamento é bicarbonatada cálcica sódica (1A), que evoluiu para bicarbonatada cloretada sódica (2A) e consequentemente para bicarbonatada sódica (3A). A água de abastecimento é de fáceis bicarbonatada cloretada sódica (1A) e cloretada bicarbonatada sódica (2A e 3A).

De acordo com a classificação de Wilcox, a aptidão da água de abastecimento para uso agrícola classifica-se sempre nas classes C2S1. A água de irrigação evolui de

C2S1 (1A e 2A) para C3S1 (3A). A água de alagamento, em 1A e 2A, pertence à classe C3S1 evoluindo na última amostragem (3A) em alguns pontos para as classes C3S2 e C4S2.

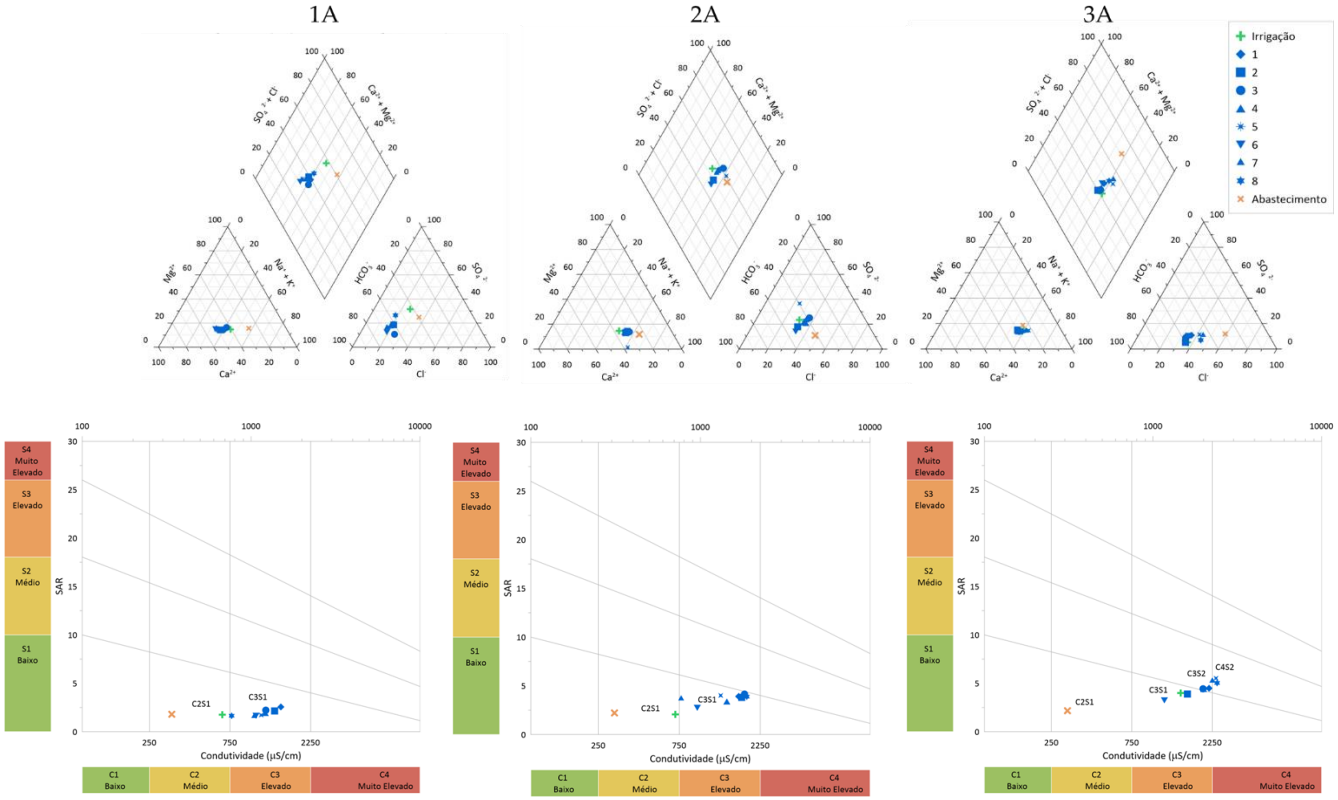


Figura 2. Projeção em diagrama triangular de Piper e Diagrama de Wilcox das amostras de água de irrigação e alagamento referente ao canteiro onde foi cultivada a variedade Ceres no segundo ano de ensaio na primeira (1A), segunda (2A) e terceira (3A) amostragens.

4. Discussão

Em ambos os anos de ensaio, o pH da água de irrigação oscilou entre 6,30 - 7,80, da água de alagamento entre 6,60 - 8,08 e de abastecimento entre 6,90 - 7,49 (**Tabela 1**). No que diz respeito à condutividade elétrica (CE), não considerando distinção entre anos, oscilou entre 420 - 1714 µS.cm^{-1} (irrigação), 766 - 2400 µS.cm^{-1} (alagamento) e 311 - 376 µS.cm^{-1} (abastecimento) (**Tabela 1**). A legislação Decreto-Lei n.º 236/98 [7] regulamenta a qualidade da água para fins de rega. Relativamente ao pH, o decreto estabelece como valor máximo recomendável (VMR) o intervalo correspondente entre 6,5 e 8,4. Os valores de pH nas duas campanhas agrícolas não excederam o VMR, exceto no segundo ano, em um ponto de amostragem de água de alagamento (3A). Relativamente ao índice SAR o VMR é de 8, também nunca excedido ao longo do ensaio. Os valores de VMR para o Cl^-, SO_4^{2-} e NO_3^- são de 70, 575 e 50 mg.L^{-1}, respetivamente. Com exceção da concentração de Cl^-, os valores obtidos não superaram os VMR estabelecidos. A mineralização da água subterrânea

está dependente da origem, do percurso que a água segue até ao ponto de amostragem, da aptidão para dissolver o substrato rochoso com que contacta e do enquadramento geológico da região [8].

A classificação da água pode ser feita com base na sua composição química, recorrendo a diagramas como os de Piper, que indicam a predominância relativa de determinados iões, com particular incidência nos principais aniões e catiões. De acordo com a projeção triangular de Piper a água de irrigação é de fáceis cloretada bicarbonatada sódica no primeiro ano, com evolução de bicarbonatada sulfatada sódica cálcica (1A), bicarbonatada cloretada sódica cálcica (2A) e cloretada cálcica (3A) no segundo ano (B) (**Figura 1 e 2**). A água de alagamento no segundo ano, alterou a sua fáceis, de bicarbonatada cálcica sódica (1A), para bicarbonatada cloretada sódica (2A) e bicarbonatada sódica (3A). A água de abastecimento manteve a sua fáceis bicarbonatada cloretada sódica no primeiro e segundo ano (1A).

Para uso agrícola, a aptidão da água é determinada pelo diagrama de Wilcox, que classifica a CE em categorias de C1 a C4 e o Rácio de Adsorção de Sódio (SAR) entre S1 e S4. O índice SAR é um parâmetro crucial na avaliação da qualidade da água de rega, pois valores elevados de sódio (Na^+) combinados com baixos níveis de cálcio (Ca^{2+}) podem saturar o complexo de troca catiónica, afetando o desenvolvimento das culturas [9]. Considerando que a água de irrigação e abastecimento pertencem à classe C2S1, e, de alagamento à classe C3S1, apresentam risco médio a elevado de alcalinização do solo e, de acordo com SAR demonstraram baixo perigo de sodização do solo, podendo por isso esta água ser utilizada em culturas moderadamente tolerantes aos sais e em praticamente todos os tipos de solos. As amostras da água de alagamento pertencem às classes C3S1, C3S2 e C4S2 de onde advém o risco elevado a muito elevado de alcalinização do solo. Este risco, na água de alagamento, permitiu inferir que o seu uso é pouco recomendável em solos cuja rede de drenagem não é eficaz [10].

A qualidade da água é determinada com base na ocorrência de contaminantes, aspeto essencial para o desenvolvimento das culturas e conservação dos ecossistemas. O facto de a amostragem ter ocorrido após aplicação de produtos fitofarmacêuticos e/ou fertilizantes, pode ter contribuído para o aumento da concentração de alguns elementos. A diminuição da qualidade da água muitas vezes deve-se ao uso excessivo de pesticidas e fertilizantes, que contribuem para o aumento da concentração de nitratos e agravamento da problemática associada à salinidade não só na água, mas também no solo [10].

Assim, embora ocorressem oscilações nos resultados obtidos, estes não comprometeram a qualidade da água utilizada no decurso de ambas as campanhas agrícolas.

5. Conclusão

A qualidade da água utilizada na produção de arroz na Lezíria Ribatejana, em Salvaterra de Magos, mostrou-se adequada para o cultivo, enquadrando-se nos valores normativos recomendados. A monitorização efetuada ao longo dos dois anos consecutivos revelou variações na composição físico-química da água de irrigação, com alterações nos teores de sais e no pH, que passou de ligeiramente ácido para neutro a alcalino. Apesar dessas variações, a classificação de Wilcox indica que a água não apresenta risco significativo de sodização do solo, embora possa promover a precipitação de sais. Assim, os resultados obtidos reforçam a importância do controlo contínuo da qualidade da água como parte das boas práticas agrícolas, assegurando a sustentabilidade da produção e a segurança alimentar.

6. Patentes

Contribuição dos Autores: Conceptualização, A.C.M. e M.S.; metodologia, A.C.M., M.S. e F.C.L.; investigação, A.C.M., I.C.L., A.R.F.C., C.C.P. e D.D.; análises, A.C.M. e M.S.; recursos, M.S., M.M.S., P.L., I.P.P., J. C. R., J.N.S., L.P., F.R. e F.C.L.; escrita – preparação do documento inicial, A.C.M.; redação – revisão e edição, A.C.M. e M.S.; supervisão, M.S., P.S.-C. e A.S.A.; administração de projetos, F.C.L.; aquisição de fundos, F.C.L. Todos os autores leram e concordaram com esta versão do manuscrito.

Financiamento: O trabalho foi financiado através do PDR2020 (projeto PDR2020-101 030671), e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia I.P., através da bolsa 2022.10859.BD, dos centros de investigação GeoBioTec (UIDB/04035/2020, https://doi.org/10.54499/UIDB/04035/2020) Centro de Estudos Florestais (UIDB/00239/2020), e do Laboratório Associado TERRA (LA/P/0092/2020).

Declaração do Conselho de Revisão Institucional: Não aplicável.

Declaração de Consentimento Informado: Não aplicável.

Agradecimentos: Os autores agradecem a Lourenço Palha do Centro de Competências do Arroz (COTArroz) e à empresa Orivárzea (Orizicultores do Ribatejo, S.A.) pela assistência técnica. Agradecimento também aos centros de investigação e desenvolvimento GEOBIOTEC (GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias) - UID/04035, CEF (Centro de Estudos Florestais) - UIDB/00239/2020 e ao Laboratório Associado TERRA (LA/P/0092/2020) pelo apoio.

Conflito of Interesses: The authors declare no conflict of interest.

Referências

1. Fraga, H.; Guimarães, N.; Santos, J. Future Changes in Rice Bioclimatic Growing Conditions in Portugal. *Agronomy* **2019**, *9*, 674.
2. Fukagawa, N.K.; Ziska, L.H. Rice: Importance for global nutrition. *Journal Nutrition Science Vitaminology* **2019**, *65*, S2–S3.
3. Mallareddy, M.; Thirumalaikumar, R.; Balasubramanian, P.; Naseeruddin, R.; Nithya, N.; Mariadoss, A.; Eazhilkrishna, N.; Choudhary, A.K.; Deiveegan, M.; Subramanian, E.; et al. Maximizing water use efficiency in rice farming: A comprehensive review of innovative irrigation management technologies. *Water* **2023**, *15*, 1802.

4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Coping with Water Scarcity in Agriculture; FAO: Rome, Italy, 2012. Disponível online: https://www.fao.org/3/i6459e/i6459e.pdf (consultado a 12 de Março de 2025).
5. Rodier, J.; Legube, B.; Merlet, N. L'Analyse de l'Eau, 9th ed.; Dunod: Paris, France, **2009**, 1579. ISBN 9782100072460.
6. Medina, L. (ed.).: Handbook of water analysis. CRC Press **2000**
7. Decreto Decreto-Lei n.º 236/1998, de 1 de agosto. *Diário da República*, *1.ª série-A, n.º 174*. Disponível em https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/236-1998-430457 (consultada a 25 de Março de 2025)
8. Carvalho, J.M. Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, **2006.**
9. Singh, A.K.; Kumar, S.R. Quality assessment of groundwater for drinking and irrigation use in semi-urban area of Tripura, India. *Ecology Environment and Conservation* **2015**, *21*, 97–108.
10. Silva, M. C. N. Papel dos ácidos húmicos na mineralização do azoto em solos florestais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, **2009**.

Zinc Biofortification and Irrigation in Mediterranean Vineyards: Effects on Photosynthetic Parameters

Diana Daccak [1,2]*,Cláudia Pessoa [1,2], Inês Luís [1,2], Ana Marques [1,2], Ana Coelho [1,2], José Ramalho [2,3], Mauro Guerra [4], Roberta Leitão [4], Graça Brito [1,2], José Kullberg [1,2] , Paula Scotti-Campos [2,5], José Semedo [2,5], Isabel Pais [2,5], Fernando Reboredo [1,2], Maria Silva [1,2], Manuela Simões [1,2], José Almeida[1,2], Paulo Legoinha [1,2], Fernando Lidon [1,2]

[1] Earth Sciences Department of NOVA School of Science and Technology, Campus Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; d.daccak@campus.fct.unl.pt; c.pessoa@fct.unl.pt; idc.rodrigues@campus.fct.unl.pt; amc.marques@campus.fct.unl.pt; arf.coelho@fct.unl.pt; fhr@fct.unl.pt; mma.silva@fct.unl.pt; mmsr@fct.unl.pt; pal@fct.unl.pt; fjl@fct.unl.pt

[2] GEOBIOTEC Research Center, NOVA University of Lisbon, 2829-516 Caparica, Portugal; cochichor@mail.telepac.pt; paula.scotti@iniav.pt; jose.semedo@iniav.pt; isabel.pais@iniav.pt

[3] Plant Stress and Biodiversity Laboratory, Forest Research Center (CEF), Associate Laboratory TERRA, School of Agriculture (ISA), University of Lisbon (ULisboa), Quinta do Marquês, Avenida da República, 2784-505 Oeiras, and Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

[4] LIBPhys-UNL, Physics Department of NOVA School of Sciences and Technology, Campus Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; mguerra@fct.unl.pt; rg.leitao@fct.unl.pt

[5] National Institute for Agrarian and Veterinary Research, Quinta do Marquês, Avenida da República, 2780-157 Oeiras, Portugal

* Correspondence: d.daccak@campus.fct.unl.pt

Abstract: The nutritional status of agricultural crops is a growing concern, with Zn playing a crucial role due to its structural, catalytic, and regulatory functions. Accordingly, an Zn agronomic biofortification strategy was implemented on *Vitis vinifera* L. varieties Castelão (non-irrigated) and Syrah (irrigated) in Portugal. After flowering, three foliar applications of ZnO (450 g·ha^{-1}) were performed. Zinc content in plant tissues was assessed using a μ-EDXRF, along with the evaluation of photosynthetic parameters. Additionally, field surface drainage was assessed through UAVs. Agronomic biofortification increased Zn-content in the skin and seeds, rising 1.3 to 2.5-fold increase. From an ecophysiological perspective, Zn application in Castelão resulted in a reduction of Pn and gs at a later growth stage. However, iWUE increased, suggesting that Zn did not negatively affect the normal photosynthetic functioning. Nevertheless, in Syrah no significant impact on Pn and gs was observed (with values being even higher after Zn application), along with a significant increase in iWUE. Regarding soil morphology, both fields predominantly have a moderate drainage capacity. Overall, Zn biofortification effectively increased Zn in grape tissues without impairing the photosynthetic machinery. Furthermore, Syrah demonstrated a better response, which can suggest potential irrigation benefits for photosynthesis.

Keywords: Drainage; Irrigation; Mediterranean climate, *Vitis vinifera* L.; Zinc biofortification.

1. Introduction

Zinc is an essential micronutrient linked to several plant functions. It participates in catalytic activities, with more than 300 Zn-dependent proteins, such as carbonic anhydrase, facilitating critical metabolic processes [1, 2]. Structurally, Zn is present in protein kinases and alcohol dehydrogenases, supporting enzymatic stability and function [1, 2]. Considering its physiological importance, most crops demand Zn concentrations ranging from 15 to 20 mg kg^{-1} dry weight (dw) to sustain their metabolic functions and ensure optimal yield [3, 4]. However, exceeding the Zn threshold can lead to toxicity symptoms, including reduced root and shoot growth, metabolic imbalances, and oxidative damage [3, 4]. Furthermore, excessive Zn levels can interfere with ionic balance and reversibly inhibit photosystems I and II under temporary stress conditions [4].

Grapes are a very important fruit crop, widely cultivated worldwide, mainly for winemaking [5]. Among agricultural crops, grapes are susceptible to Zn deficits [6]. To address Zn deficiency, agronomic biofortification has been implemented across various crops [7]. This approach aims to increase nutrient levels in the edible portions of plants through specific agricultural practices (through soil and/or foliar fertilization) [8, 9]. According to several studies, foliar application is more efficient and facilitates nutrient translocation throughout the growth cycle, as demonstrated in chickpeas [10]. Moreover, foliar biofortification has shown promising results in improving yield, quality, and Zn content in grains of rice and wheat [11].

As global climate change intensifies, increasing temperature and decreasing water availability, the evapotranspiration of plants and soil has risen leading to a progressively negative soil water balance [12]. Hence, precision agriculture techniques, particularly the use of UAVs (unmanned aerial vehicles) are crucial [14, 15]. This technology enables the capture of high-resolution images and can provide valuable information on the drainage capacity of fields, which is an important aspect for an effective water management [13, 14].

Following this assumption, Zn biofortification of grapes *Vitis vinifera* L. variety Syrah and Castelão through foliar spraying with ZnO prompt this study. Furthermore, Zn accumulation in the tissues and physiological characteristics of grapes were assessed. To characterize the vineyards, UAV field images were acquired and processed to estimate surface drainage and the potential influence of water on agronomic biofortification.

2. Material and Methods

2.1. Agronomic Workflow

Zinc agronomic biofortification was carried out on two *Vitis vinifera* L. varieties - Syrah (non-irrigated) and Castelão (irrigated). The experimental vineyards were located in Palmela - Portugal (GPS coordinates: - 38° 35'23.629"N; 8° 51' 46.208" W - Syrah field and 38°36'01.19"N; 8°48'18.18" W - Castelão field). After flowering, three foliar applications of ZnO with a concentration of 450 $g.ha^{-1}$ were sprayed on 48 plants (keeping the same number of control vines separated by a zero line). Harvest was performed by 14 and 25 September for Syrah and Castelão, respectively. During the production cycle, between 16 June (first application) and 25 September (last harvest), the average maximum and minimum temperatures were assessed in the national meteorological network of Montijo, Portugal (GPS coordinates: 38°43'28.7'N, 9°0'40.114'O) varying between 28 and 16.6°C, respectively.

2.2. Field Morphology

Altimetry and multispectral images were acquired using a UAV (DJI Phantom 4 Pro+ drone) with an integrated RGB camera and a Parrot Sequoia multispectral camera, which is capable of recording the reflectance of objects at wavelengths in the green (550 ± 5 nm), red (660 ± 5 nm), red edge (735 ± 5 nm) and near infrared (790 ± 5 nm) bands. The field morphology and surface water drainage of the experimental fields were obtained by processing the RGB images obtained with Agisoft Metashape software. The evaluation of the drainage areas of surface water was carried out according to [14, 15]. The highest class corresponded to land that, due to its morphology, enhanced surface water runoff and the lowest class to flat surfaces as potential infiltration areas, since they promote the accumulation of surface water [14 -16].

2.3. Leaf Gas Exchange Analysis

Leaf gas exchange in vineyards was measured on leaves (n = 4–6) from different plants (considering the 2nd youngest leaves fully expanded per treatment) [17]. Net photosynthesis rate (P_n), stomatal conductance to water vapor (g_s), and transpiration (E) were measured under steady-state photosynthetic conditions after 2 hours of middle morning illumination [17]. A portable open-system infrared gas analyzer (Li-Cor 6400, Li-Cor, Lincoln, NE, USA) was used under environmental conditions, with external CO_2 (ca. 400 ppm) and the photosynthetic photon flux density (PPFD) between 1200 and 1400 µmol m^{-2} s^{-1}. Leaf instantaneous water use efficiency (iWUE) was calculated as the Pn-to-E ratio, indicating the units of assimilated CO2 per unit of water lost via transpiration [17].

2.4. Quantification of Zinc Content in Grape Tissues at Harvest

Zinc localization in the skin and seeds of harvested grapes was analyzed using an µ-EDXRF system (M4 Tornado™, Bruker, Germany) as described in [18]. The X-ray generator was set to 50 kV and 100 µA, operating without filters to enhance the ionization of low-Z elements. To improve the accuracy of Zn quantification, a set of three Al/Ti/Cu foils (100/50/25 µm thick) was placed between the X-ray tube and the sample, with measurements performed at 600 µA. Fluorescence radiation was detected using an energy-dispersive silicon drift detector (XFlash™) with a 30 mm^2 sensitive area and an energy resolution of 142 eV for Mn Kα. Measurements were conducted under 20 mbar vacuum conditions, with each spectrum acquired over 200 s.

3. Results

3.1. Field Morphology

It is well known that surface water drainage is significantly influenced by morphological characteristics. In the Castelão field, approximately half of the area favors water accumulation and infiltration (depending on the permeability characteristics of the soil), whereas the remaining area exhibits conditions more favorable to surface drainage (Figure 1). However, in the Syrah field only around one-third of the area is suitable for surface water infiltration (Figure 1).

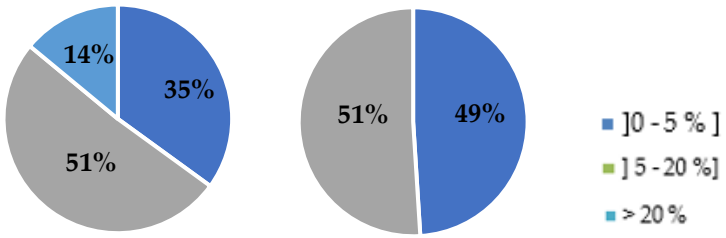


Figure 1. Surface water drainage of Syrah and Castelão fields obtained with *Agisoft Metashape software*. The highest class corresponds to > 20 % and the lowest to] 0 -5 %] where the water is more prone to accumulation and infiltration.

3.2. Monitoring of Photoassimilates during Zinc Agronomic Biofortification

After the third foliar application, P_n, g_s, E and iWUE were evaluated to assess the potential effects of foliar agronomic biofortification with ZnO (Table 1). During the first evaluation, the Syrah variety sprayed with ZnO exhibited a significant decline in P_n, attributed to a lower g_s (Table 1). Additionally, a significantly lower E and an increase in iWUE were observed in the biofortified sample (Table 1). On August 1st,

the Castelão variety showed a significant increase in P_n, g_s and iWUE, along with a significantly lower value for E (Table 1). At a later stage, Syrah showed no significant variations in P_n and g_s but exhibited a significant decrease in E and an increase in iWUE with the application of ZnO (Table 1). In contrast, during the second evaluation, Castelão with ZnO revealed significant differences in P_n and iWUE with a lower value, while g_s and E remained similar (Table 1).

Table 1. Average ± S.E. of leaf gas exchange parameters, net photosynthesis (P_n), stomatal conductance to water vapor (g_s), as well as variation in the instantaneous water use efficiency (iWUE = P_n/E) in leaves of *Vitis vinifera*, varieties Syrah and Castelão, after the 3rd leaf spraying with ZnO 450 g.ha^{-1}. For each parameter and variety, the average value ± S.E. (n = 4- 6) is succeeded by different letters indicating significant differences between samples (a, b) (statistical analysis using the single factor ANOVA test, $p < 0.05$).

Sample	Syrah		Castelão	
	27 july	13 september	1 august	13 september
	P_n (µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)			
Control	17.5±0.0 a	13.6±0.4 a	15.9±0.2 b	14.7±1.0 a
ZnO 450 g.ha^{-1}	16.4±0.1 b	13.7±0.1 a	17.1±0.2 a	11.5±0.4 b
	g_s (mmol H_2O $m^{-2}s^{-1}$)			
Control	146.0±1.7 a	201.3±5.8 a	151.8±1.7 b	164.7±17.5 a
ZnO 450 g.ha^{-1}	131.0±2.9 b	197.8±4.4 a	175.0±3.2 a	129.5±7.4 a
	E (mmol H_2O $m^{-2}s^{-1}$)			
Control	4.5±0.0 a	5.4±0.1 a	5.3±0.0 a	4.9±0.3 a
ZnO 450 g.ha^{-1}	3.9±0.0 b	4.6±0.1 b	4.9±0.1 b	4.4±0.2 a
	iWUE (mmol CO_2 mol^{-1} H_2O)			
Control	3.9±0.0 b	2.5±0.0 b	3.0±0.0 b	3.0±0.0 a
ZnO 450 g.ha^{-1}	4.2±0.1 a	3.0±0.0 a	3.5±0.1 a	2.6±0.0 b

3.3. Quantification of Zinc Content in Grape Tissues at Harvest

At harvest, the concentration of Zn in the biofortified Syrah dry seeds and in the skin showed a significant increase of 1.7 and 2.5, respectively. On the other hand, only Castelão dry seeds showed a significant difference with the application of ZnO, although it was found an increase of 1.1 and 1.3 times.

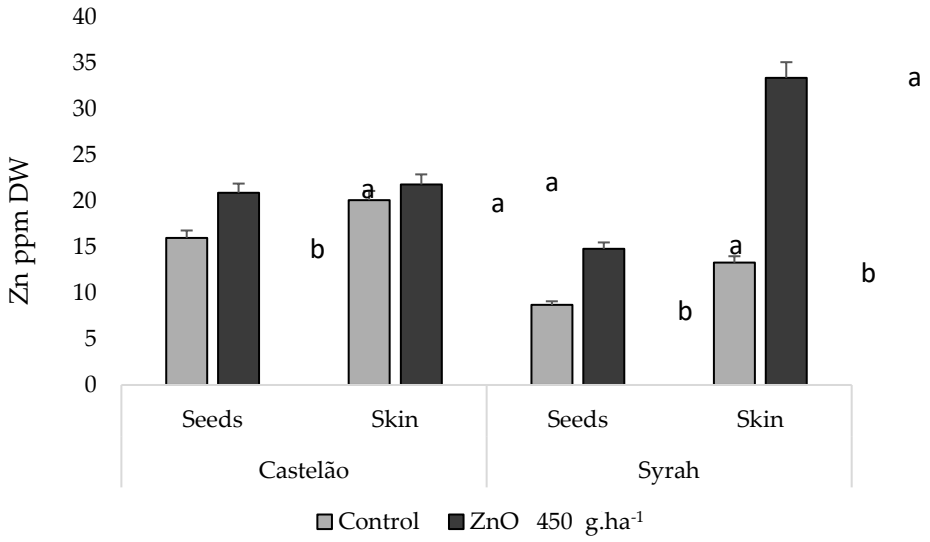


Figure 2. Average ± S.E. (n = 3) of Zn concentrations of skin and seeds of *Vitis vinifera* varieties Syrah and Castelão. Letters a, b indicate significant differences between samples (statistical analysis using the single factor ANOVA test, $p \leq 0.05$).

4. Discussion

Water availability is known to be a major stress factor for grapes, resulting in reduced yields and diminished quality [19]. In such stressful conditions, various physiological changes can occur, including declines in relative water content (RWC), leaf dry mass, chlorophyll levels, net photosynthetic rates, and the activities of key enzymes such as ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase (RuBPC) [19]. In this context, the slope and the length of the soil slope are important factors that control the intensity and frequency of surface runoff. The field characterization in this study showed predominantly areas of low and moderate surface drainage (*i.e.*, classes 1 and 2, with slopes ranging from 0-20%). Between both fields, Castelão is more prone to the accumulation and/or infiltration of surface water (Figure 1). Although Syrah is more susceptible to water deficits, the vineyard is irrigated, which mitigates potential water stress.

At a physiological perspective, leaf gas exchange parameters were evaluated for both varieties with Syrah and Castelão showing a different response along the cycle. Regarding Syrah, initially an impact in P_n and g_s was observed, although in a latter stage an increase in iWUE and a maintenance of P_n and g_s prevailed. Contrarily, Castelão a non-irrigated variety, initially, showed an significant increase in P_n, g_s and iWUE. However, in the second assessment, it revealed an impact in P_n and iWUE. Indeed, an increase of Zn in plant species can improve P_n, and stomatal conductance (g_s) [20]. This can be related to zinc's role to chlorophyll synthesis and its involvement in the activity of carbonic anhydrase involved in the movement of CO_2 into

chloroplasts [20]. Nevertheless, at a later stage, this suggests that Zn biofortification with irrigation can have a potential benefit in crops photosynthetic machinery. Despite slightly toxic levels of Zn can decrease P_n due to g_s reduction, the variation on Zn biofortification response between varieties and evaluation dates may be linked to other factors - such as high temperatures - which can also restrict photosynthesis through the closure of stomata and non-stomatal limitations (e.g. biochemical reactions) [21, 22]. This is particularly relevant since, by the end of the productive cycle, the vineyards of the study are subjected to higher temperatures [23]. As it is known, deficit irrigation conditions can cause stress in the plant and cause losses in the yield. Accordingly, as observed in [24] zinc foliar application led to benefits in the irrigated variety of this study compared to the non-irrigated variety.

At harvest Zn tissue accumulation showed a higher level in the skin compared to the seeds. Also, after three foliar applications with ZnO, a significant increase in Zn levels in Syrah and Castelão tissues was observed (except in the case of Castelão skin). These findings are consistent with those reported in [25], concerning Cabernet Sauvignon cultivated under Mediterranean climate conditions, despite the use of a different methodology. In fact, according to [26] mineral elements primarily accumulate in the skin and pulp after the *veraison,* leading to higher levels in these tissues.

5. Conclusions

In this context, ZnO agronomic biofortification at 450 $g.ha^{-1}$ proved to be effective in both grape varieties, resulting in a 1.3- to 2.5-fold increase of Zn concentration in Castelão and Syrah, respectively. Moreover, at later stages of the productive cycle, increased Zn levels may offer potential benefits for photosynthetic activity. However, water availability must be considered, highlighting the importance of irrigation to optimize the plant's response.

Author Contributions: Conceptualization, D.D., J.R., and F.L.; methodology, J.R., G.B., J.K., M.S.; F.R.; P.L., and F.L.; software, D.D., M.G., R.L. and G.B.; formal analysis, D.D., C.P., I.L., A.M., A.C., J.R., M.G. and R.L.; investigation, D.D., C.P., I.L., A.M., A.C.; resources, P.S-C., I.P., J.S. ; M.S. and M.S.; writing—original draft preparation, D.D.; writing—review and editing, D.D.; supervision, F.L.; project administration, F.L.; funding acquisition, F.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Support from PDR2020-101-030727 and Fundação para a Ciência e Tecnologia I.P. (FCT)-2023.01847.BDANA through the research centers GeoBioTec (R & D Unit GEOBIOTEC - UID/04035: GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias), CEF (UIDB/00239/2020, https://doi.org/10.54499/UIDB/00239/2020) and Associate Laboratory TERRA (LA/P/0092/2020, https://doi.org/0.54499/LA/P/0092/2020).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.**Informed Consent Statement:** Not applicable.**Data Availability Statement:** Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to thank Luís Silva (Adega Cooperativa de Palmela- Casa Agrícola Nunes Oliveira da Silva Lda) for his technical assistance with the PDR2020-101-461 030727 project. **Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. **References**

Ajeesh Krishna, T.P.; Maharajan, T.; Roch, V.G.; Ignacimuthu, S.; Ceasar, A.S. Structure, function, regulation and phylogenetic relationship of ZIP family transporters of plants. *Front. Plant Sci.* **2020**, 11, 662. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00662

2. Khan, S.T.; Malik, A.; Alwarthan, A.; Shaik, M.R. The enormity of the Zinc deficiency problem and available solutions; an overview. *Arab. J. Chem.* **2021**, 15, 103668. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103668
3. Ackova, D.G. Heavy metals and their general toxicity on plants. *Plant Sci. Today* **2018**, 5, 15–19. https://doi.org/10.14719/pst.2018.5.1.355
4. Ghori, N.H.; Ghori, T.; Hayat, M.Q.; Imadi, S.R.; Gul, A.; Altay, V.; Ozturk, M. Heavy metal stress and responses in plants. *Int. J.Sci. Environ. Technol.* **2019**, 16, 1807–1828. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8
5. Khadatkar, A.; Sawant, C.P.; Thorat, D.; Gupta, A.; Jadhav, S.; Gawande, D.; Magar, A.P. A comprehensive review on grapes (*Vitis* spp.) cultivation and its crop management. *Discov Agric* **2025** 3, 9. https://doi.org/10.1007/s44279-025-00162-2
6. Noulas, C.; Tziouvalekas, M.; Karyotis, T. Zinc in soils, water and food crops. *J Trace Elem Med Biol*. **2018**, 49, 252-260. 46 https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009
7. Harvestplus Homepage. Available online: https://www.harvestplus.org/ (accessed on 15 march 2025).
8. Pal, V.; Singh, G.; Dhaliwal, S.S. Agronomic biofortification of chickpea with zinc and iron through application of zinc and urea, Commun. *Soil Sci. Plant Anal.* **2019**, 50, 1864–1877. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1648490
9. Valença, A.W.; Bake, A.; Brouwer, I.D.; Giller, K.E. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Glob. Food Sec*. **2017**, 12, 8–14. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001
10. Hidoto, L.; Worku, W.; Mohammed, H.; Bunyamin, T. Effects of zinc application strategy on zinc content and productivity of chickpea grown under zinc deficient soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr*. **2017**, 17, 112–126. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000009
11. Kandil, E.E.; El-Banna, A.A.A.; Tabl, D.M.M.; Mackled, M.I.; Ghareeb, R.Y.; Al-Huqail, A.A.; Ali, H.M.; Jebril, J.; Abdelsalam, N.R. Zinc nutrition responses to agronomic and yield traits, kernel quality, and pollen viability in rice (*Oryza sativa* L.). *Front. Plant Sci.* **2022**, 13, 791066. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.791066
12. Yang, C.; Menz, C.; Fraga, H.; Costafreda-Aumedes, S.; Leolini, L.; Ramos, M. C.; Molitor, D.; Leuuwen, C.V.; Santos, J.A. Assessing the grapevine crop water stress indicator over the flowering-veraison phase and the potential yield lose rate in important European wine regions. *Agric. Water Manag.* **2022**, 261, 107349. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107349
13. Radoglou-Grammatikis, P.; Sarigiannidis, P., Lagkas, T.; Moscholios, I. A Compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks* **2020**, *172*, 107148. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148
14. Brito, M.G.; Costa, C.N.; Almeida, J.A.; Vendas, D.; Verdial, P.H. Characterization of maximum infiltration areas using GIS tools. *J. Eng. Geol*. **2006**, 85, 14-18. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.09.022
15. Oliveira, M.M.; Lobo Ferreira, J.P. (2002). Proposta de uma metodologia para a definição de áreas de infiltração máxima. Em 6th National Water Congress, Maio. p.16.
16. Direcção Geral de Agricultura Desenvolvimento Rural. Carta de Capacidade de Uso do Solo de Portugal—Bases e Normas Adoptadas na Sua Elaboração, 6th ed.; Ministério da Economia, Secretaria de Estado da Agricultura, Serviço de Reconhecimento e de Ordenamento Agrário: Lisboa, Portugal, 1972; pp. 25–26.
17. Rodrigues, W.P.; Martins, M.Q.; Fortunato, A.S.; Rodrigues, A.P.; Semedo, J.N.; Simões-Costa, M.C.; Pais, I.P.; Leitão, A.E.; Colwell, F.; Goulão, L.; et al. Long-term air [CO_2] strenghtens photosymthetic functioning and mitigates the impact of supraoptimal temperatures in tropical Coffea arabica and C. canephora species. *Glob. Change Biol*. **2016**, 22, 415–431. https://doi.org/10.1111/gcb.13088
18. Daccak, D.; Lidon, F.C.; Pessoa, C.C.; Luís, I.C.; Coelho, A.R.F.; Marques, A.C.; Ramalho, J.C.; Silva, M.J.; Rodrigues, A.P.; Guerra, M.; Leitão, R.G.; Campos, P.S.; Pais, I.P.; Semedo, J.N.; Silva, M.M.; Kullberg, J.C.; Brito, M.; Galhano, C.; Legoinha, P.; Pessoa, M.F.; Simões, M.; Reboredo, F.H.

Enrichment of Grapes with zinc-efficiency of foliar fertilization with $ZnSO_4$ and ZnO and implications on winemaking. *Plants* **2022**, 11, 1399. https://doi.org/10.3390/plants11111399

19. Ju, Y.; Yue, X.; Zhao, X.; Zhao, H.; Fang, Y. Physiological, micro-morphological and metabolomic analysis of grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaf of plants under water stress. *Plant Physiol. Biochem.* **2018**, *130*, 501–510. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.036
20. Ahmed, N.; Ahmad, F.; Abid, M.; Ullah, M.A. Impact of zinc fertilization on gas exchange characteristics and water use efficiencyof cotton crop under arid environment. *Pak. J. Bot*. **2009**, 41, 2189–2197.
21. Kaur, H.; Garg, N. Zinc toxicity in plants: A review. *Planta* **2021**, 253, 129. https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z
22. Ashraf, M.; Harris, P.J.C. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* **2013**, 51, 163–190. https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6
23. Moutinho-Pereira, J.M.; Correia, C.M.; Gonçalves, B.M.; Bacelar, E.A.; Torres-Pereira, J.M. Leaf gas exchange and water relations of grapevines grown in three different conditions. *Photosynthetica* **2004**, 42, 81–86. https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000040573.09614.1d
24. Açık, A.; Öncan Sümer, F. Foliar application of zinc improves agronomical and quality parameters and biofortification of Cowpea (*Vigna sinensis*) under deficit irrigation. *Agronomy* **2023**, *13*, 1021. https://doi.org/10.3390/agronomy13041021
25. Ramos, M.C.; Romero, M. P. Effects of soil characteristics and leaf thinning on micronutrient uptake and redistribution in'Cabernet Sauvignon'. *VITIS* **2016,** 55, 113-120. https://doi.org/10.5073/vitis.2016.55.113-120
26. Rogiers, S.Y.; Greer, D.H.; Hatfield, J.M.; Orchard, B.A.; Keller, M. (2006). Mineral sinks within ripening grape berries (*Vitis vinifera* L.). *Vitis* **2006**, 45, 115. https://doi.org/10.5073/vitis.2006.45.115-123

¿Cómo medimos en laboratorio la longitud máxima que puede tener una tubería emisora de riego localizado?

Iban Balbastre-Peralta [1], César González-Pavón [2], Juan Manzano-Juárez[1] and Carmen Virginia Palau [1,*]

[1] Centro Valenciano de Estudios del Riego (CVER) y Laboratorio de Hidráulica y Riegos (LHIR), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; virpaes@agf.upv.es (C.V.P.); juamanju@agf.upv.es (J.M.J.); ibbalpe@agf.upv.es (I.B.P.)

[2] Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; csagonpa@upv.edu.es

* Correspondencia: virpaes@agf.upv.es

Abstract: En el diseño de subunidades de riego localizado, la determinación de la longitud máxima de tubería con emisores integrados es un parámetro clave que depende del caudal nominal, la separación entre emisores y las condiciones de presión del sistema hidráulico. Tradicionalmente, este cálculo se basa en ecuaciones de pérdidas de carga, pero las metodologías utilizadas, como la longitud equivalente o la mayoración de pérdidas por rozamiento, presentan limitaciones. Dado que los fabricantes no suministran información detallada sobre las pérdidas de carga localizadas en emisores, y la normativa vigente (ISO 9261) no contempla su determinación específica, surge la necesidad de un método experimental preciso. Este estudio propone una metodología de ensayo hidráulico en laboratorio para determinar la longitud máxima de un lateral de riego con emisores integrados bajo condiciones de presión y separación constantes. Se valida el banco de pruebas y la metodología experimental con dos emisores comerciales distintos, comparando los resultados obtenidos con los valores proporcionados en sus fichas técnicas. Los resultados permiten evaluar la precisión de los datos suministrados por los fabricantes y mejorar los criterios de diseño en sistemas de riego localizado.

Keywords: longitud máxima: riego localizado; tubería emisora

1. Introducción

En el diseño de subunidades de riego localizado, es fundamental determinar la longitud máxima de la tubería emisora que se puede instalar, considerando su caudal nominal, la separación entre emisores y las condiciones de presión a la entrada. Este parámetro se calcula de manera teórica a través de las ecuaciones de pérdidas de carga, las cuales se integran en la ecuación de la energía para evaluar la distribución de presión y garantizar una aplicación uniforme del agua. No obstante, en tuberías emisoras para cuantificar la magnitud de las pérdidas

de carga localizadas ocasionadas por los emisores integrados, se utilizan métodos muy generalistas como el de la longitud equivalente o la mayoración de las pérdidas de carga por rozamiento.

Estos datos no son suministrados por los fabricantes, y en la bibliografía existente no se ha desarrollado un método matemático sencillo ni extrapolable a todos los emisores comerciales existentes. La determinación de estas pérdidas de carga localizadas depende de múltiples factores como la geometría del emisor, el caudal o el tipo de inserción en la tubería.

La mayoría de los fabricantes suelen mostrar en sus fichas técnicas tablas de longitudes máximas, pero no se indica cómo se han obtenido dichos valores ni se pueden deducir expresiones matemáticas que abalen las pérdidas de carga que producen dichos emisores. Por otra parte, en la norma ISO 9261 [1], no se contempla su obtención ni indica cómo obtener un valor de pérdidas localizadas en unas condiciones hidráulicas establecidas de caudal, separación entre goteros y presión al inicio de la subunidad de riego.

En la presente comunicación se aborda una metodología de ensayo hidráulico en laboratorio para la obtención de la longitud máxima de un lateral de riego con emisores integrados, a una separación constante y con una variación de presión máxima entre la entrada y la salida. Además, se valida el banco y el ensayo en laboratorio para dos emisores integrados de fabricantes distintos comparando los resultados con los datos mostrados por los fabricantes en sus especificaciones técnicas.

2. Materiales and Métodos

2.1. Método teórico para estimar la longitud máxima de un lateral de riego localizado

Para definir las dimensiones de cada subunidad es interesante determinar la longitud máxima de lateral que puede alcanzarse para unas determinadas condiciones de funcionamiento. Por la ecuación de la energía o de Bernoulli, esta longitud dependerá del desnivel en el lateral, las pérdidas de carga totales producidas y la variación de presión que se admita en esta tubería.

El procedimiento teórico para calcular la longitud máxima para una determinada variación de presión entre la entrada ($\frac{P_e}{\gamma}$) y la salida del flujo ($\frac{P_s}{\gamma}$) en el lateral es:

$$\frac{\Delta P_{lat}}{\gamma} = \frac{P_e}{\gamma} - \frac{P_s}{\gamma} = z_{salida} - z_{entrada} + h_{lateral} = \Delta z + h_r + h_e \qquad (1)$$

Donde zsalida y zentrada son las cotas de la tubería emisora y hlat su pérdida de carga total que corresponde a las pérdidas por rozamiento de la conducción y las pérdidas localizadas producidas en la tubería emisora (he).

A nivel de proyecto, para calcular estas pérdidas de carga por rozamiento se emplea la ecuación fundamental de pérdidas de carga de Darcy-Weisbach con la fórmula de Blasius [2], adecuada para tuberías de polietileno (PE) con una rugosidad baja, diámetros pequeños y los números de Reynolds inferiores a 105 [3]. Además, la posible aparición de flujo laminar en el extremo final de los laterales no tiene un impacto físico significativo [4]. Por lo tanto, las pérdidas de carga en un lateral de riego localizado con una distribución discreta de caudal (Figura 1) se estiman a través de Blasius. De esta forma, para una tubería emisora con diámetro D, caudal al inicio Q, longitud L, coeficiente reductor de F(n) de Christiansen [5] y viscosidad cinemática del agua ν, se expresan como:

$$h_r = 0.0246 \cdot F(n) \cdot L \cdot \nu^{0.25} \cdot Q^{1.75} \cdot D^{-4.75} \qquad (2)$$

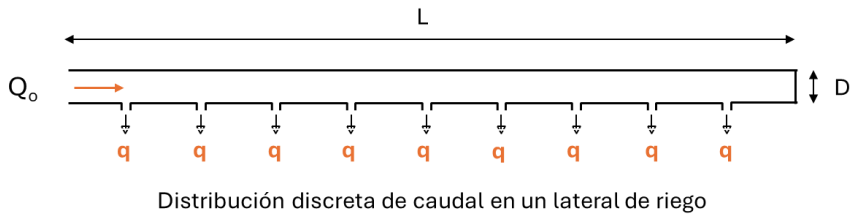


Figura 1. Distribución discreta de caudal en un lateral de riego localizado.

No obstante, en esta ecuación no se han tenido en cuenta las pérdidas localizadas por inserción o impacto del flujo de agua con cada emisor. Esta pérdida de energía es difícil de estimar ya que depende de múltiples factores. Sin embargo, aunque cada emisor individual genera una pérdida de carga localizada pequeña en el punto de inserción, la suma de todas estas pérdidas a lo largo de un lateral puede volverse significativa. Esto es especialmente relevante cuando la separación entre emisores es muy reducida, lo que implica la inserción de un gran número de emisores a lo largo del lateral de riego [6], [7], [8], [9], [10].

Arviza [11] en su tesis propuso una aproximación a estas pérdidas de carga localizadas (he), a partir de la geometría interna del emisor integrado, del número de emisores en el lateral (n) y del caudal variable que entra en el lateral. A mayor caudal, generalmente la pérdida de carga será mayor. Diversos estudios han analizado la relación hidráulica entre las pérdidas de carga localizadas y las características de la tubería y el emisor [4], [7], [12], [13].

A nivel de proyecto, las pérdidas de carga totales a lo largo de un lateral de riego ("h" _" lateral") se estiman empleando coeficientes mayorantes (Km) que oscilan entre 1.1 a 1.6, dependiendo del número de emisores existentes. También, otro método estimativo es la longitud equivalente (l_e), que se define como una distancia ficticia adicional por emisor que incrementa las pérdidas de carga por rozamiento.

Simplificando y considerando las pérdidas localizadas, las pérdidas de carga en un lateral de riego serán:

$$h_{lateral} = h_r + h_e = F(n) \cdot C \cdot (L + n \cdot l_e) \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4.75} \quad (3)$$

$$K_m = \frac{L+n \cdot l_e}{L} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P_{lat}}{\gamma} = \Delta z + h_r + h_e = i \cdot L + K_m \cdot h_r = i \cdot L + K_m \cdot C \cdot L \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4.75} \cdot F(n) \quad (5)$$

Sustituyendo los datos de la tubería emisora conocidos en función del número de emisores *s* como incógnita; el caudal nominal *q* (l/h), diámetro *D* (mm), la distancia entre emisores *s* (m), la pendiente del lateral *i*, se obtiene la ecuación que relaciona la variación de presión en el lateral con el número de emisores posibles.

$$L = n \cdot s$$

$$Q = n \cdot q$$

$$\Delta z = i \cdot L = i \cdot n \cdot s$$

De esta forma, considerando una temperatura de 20ºC la $C = 14.710 \cdot \nu^{0.25} = 0.464$, para una presión a la entrada de la tubería emisora determinada y una presión mínima de funcionamiento del emisor, teniendo en cuenta desniveles y pérdidas de carga en función del número de emisores, es posible estimar la longitud máxima del lateral. Mediante cálculos iterativos se define *n*, y con el espaciamiento entre emisores *s*, se establece la longitud máxima del lateral.

$$\frac{P_e}{\gamma} - \frac{P_s}{\gamma} = i \cdot n \cdot s + K_m \cdot 0.464 \cdot (n \cdot s)(n \cdot q)^{1,75} \cdot D^{-4,75} \cdot \left(\frac{1}{2,75} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{1,75-1}}{6n^2}\right) \quad (6)$$

$$L_{lateral\ máxima} = n \cdot s \quad (7)$$

2.2. Método empírico para medir la longitud máxima de un lateral de riego localizado

El método de ensayo propuesto para determinar la longitud máxima de laterales se llevó a cabo en el Laboratorio de Riegos de la Universitat Politècnica de València. Se

ensayaron dos tuberías emisoras con las características técnicas descritas en la Tabla 1.

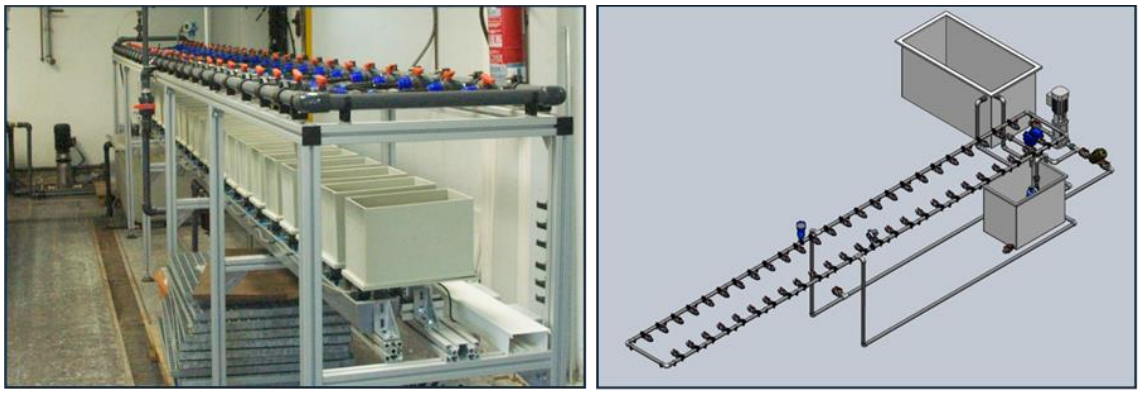
Tabla 1. Características técnicas de las tuberías emisoras ensayadas.

Identificador	**Emisor 1**	**Emisor 2**
Caudal emisor	2.3 l/h	1.6 l/h
Separación entre emisores (s)	0.75 m	0.60 m
Tipo de emisor[1]	Compensante	Compensante
Diámetro interior tubería	13.9 mm	14.2 mm
Espesor	1 mm	1 mm
Presión máxima	350 kPa	350 kPa
Presión mínima	100 kPa	25 kPa

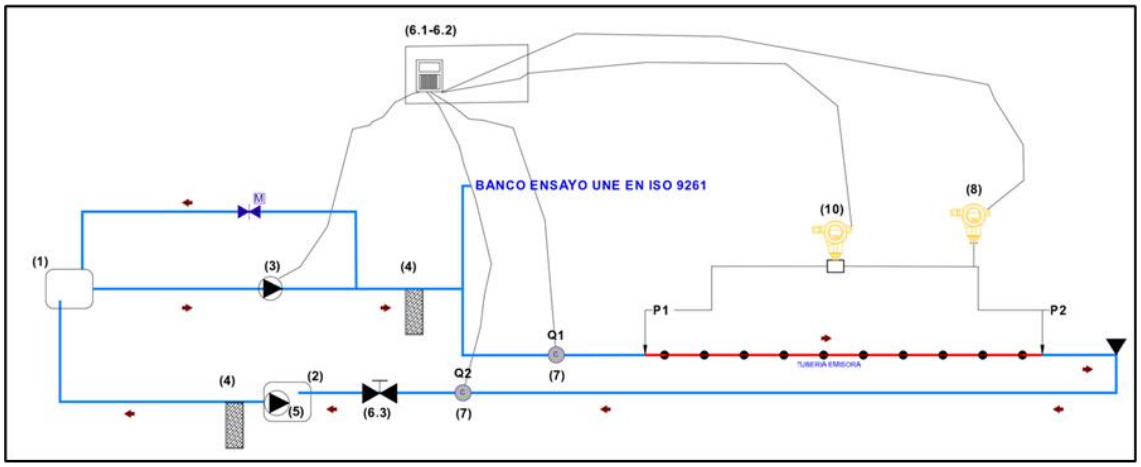
[1] según su capacidad de regulación de caudal.

2.2.1. Elementos del banco de ensayo

El banco de ensayos utilizado, que puede apreciarse en la Figura 2, es una derivación del banco de ensayos del laboratorio para el ensayo de emisores según norma ISO 9261 [1]. La aplicación específica para el control y adquisición de datos ha sido desarrollada con LabView 2013 (NI) y permite el control total de todos los elementos del banco.



(a)



(b)

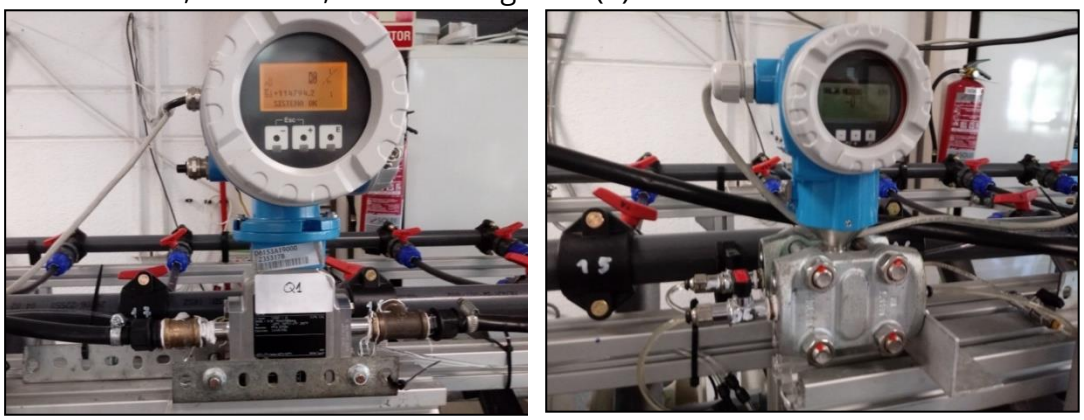
Figura 2. (**a**) Esquema general del banco de ensayos de emisores según norma UNE EN ISO 9261[1]. (**b**) Esquema hidráulico banco de ensayo obtención Longitud máxima lateral.

En el esquema hidráulico Figura 2 (b), se distinguen las siguientes instalaciones y equipos.

- Dos depósitos de polietileno; el principal de 600 l (1) está equipado con el sistema de regulación de temperatura. El segundo de 250 l de capacidad (2) recoge el agua arrojada por los emisores, antes de retornarla al depósito principal.
- Equipo de presión principal (3); bomba centrifuga vertical de acero inoxidable AISI 304, con potencia 1.1 kW, 9 rodetes y con un rango de presión de trabajo de 75 - 29.7 m y caudales 1.2- 4.5 m3/h.
- Sistema de filtrado de agua (4); compuesto por dos filtros de anillas DN 1“y grado de filtración de 100 µm.
- Sistema de recirculación de agua (5); bomba sumergida trasiego entre depósitos.
- Sistema de control y adquisición de datos de agua; (6.1) variador electrónico de frecuencia para el control de la bomba y regulación automática de la presión de ensayo; (6.2) adquisición de datos se realiza mediante autómata;

(6.3) regulación de caudales se realiza con válvulas de asiento inclinado DN 16mm.

- Sistema de medida de caudales (7); compuesto por dos caudalímetros DN8, Q1 entrada del ensayo y Q2 a la salida de la tubería. Precisión ±0,2%. Rango de medición (Qmin-Qmax) de 60 – 1800 l/h. Figura 2 (a)
- Sensores para la determinación de la presión y temperatura del ensayo; (8) transductor de presión con precisión ±0,05%, ajustado para 0 - 7 bar; (9) sensor de temperatura; (10) transductor de presión diferencial con rango de medida 0-300 kPa, 0 -50 kPa, 0 -10 kPa. Figura 2 (b)



(**a**) (**b**)

Figura 3. (**a**) Caudalímetro electromagnético Q1 entrada del ensayo. DN8 Precisión ±0,2%. Rango medición 60 – 1800 l/h (**b**) Transductor de presión diferencial con rango de medida 0-300 kPa, 0 -50 kPa, 0 -10 kPa

2.2.2. Metodología de ensayo

Para determinar en laboratorio la longitud máxima de tubería emisora en terreno plano, se propone la siguiente metodología:

1. Preparación de un tramo de tubería con 10 emisores o 8 m según la separación de emisores a ensayar. Es conveniente realizar varias muestras y ensayar tres tramos de una muestra de 500 emisores.
2. Colocar las tomas de presión a la entrada y salida del tramo a ½ *s* del primer y último emisor. Estas tomas de presión deben ser no intrusivas para que no perturben el flujo de agua en el punto de inserción.

(**a**) (**b**)

Figura 4. Tomas de conexión al transductor diferencial. (**a**) Punto de medida de presión P1 colocado aguas arriba tubería ensayada (**b**) Punto de medida de presión P2 colocado aguas abajo tubería ensayada.

3. Si el emisor es compensante, acondicionar el emisor según norma ISO 9261. Garantizando el llenado de la tubería y la salida de aire de esta.
4. Se realiza la prueba registrando la presión y caudal a la entrada y la salida del tramo de tubería emisora ensayada. Registrando la diferencia de presión entre estos dos puntos con el siguiente procedimiento:

a. Se comienza el ensayo garantizando una presión final del tramo en el último emisor (P2 = Pmin) igual a la presión mínima de ensayo según la presión del rango de compensación del emisor y con las válvulas 6.3 cerradas garantizando una lectura del Q2 = 0 y Q1 la medida de caudal de entrada registrada en el tramo ensayado.

b. En una segunda fase se modifica el caudal y presión a la entrada. Esta variación se realiza considerando el caudal y presión registradas en la etapa anterior y ajustando Q2 y P2 según la siguiente Tabla 2:

Tabla 2. Etapas del ensayo para la determinación de la longitud máxima de la tubería emisora.

Parámetro hidráulico	**Ajuste de etapa**
Caudal Q2	$Q2_{ETAPA\ i} = Q1_{ETAPA\ i-1}$
Presión ajustada a la salida P2	$P2_{ETAPA\ i} = P1_{ETAPA\ i-1}$
Presión calculada a la entrada P1	$P1_{ETAPA\ i} = P2_{ETAPA\ i} + \Delta P_{ETAPA\ i}$

Este procedimiento se repite hasta alcanzar a la entrada P1, la presión máxima del emisor fijada por el fabricante de su rango de compensación. A continuación, se muestra un ejemplo de las 4 primeras etapas del ajuste de caudal (Q2) y presión (P2) realizado durante el ensayo.

Tabla 3. Ejemplo de 4 etapas del procedimiento de ensayo.

Etapas	Q1 (l/h)	Q2 ajustada (l/h)	P1 (kPa)	P2 ajustada (kPa)	L (m)	□□P (kPa)
1	18,7	0,0	25,11	25,00	7,2	0,11
2	37,1	18,7	25,26	25,13	14,4	0,24
3	55,3	37,1	25,43	25,28	21,6	0,39
4	73,2	55,3	26,10	25,69	28,8	0,80

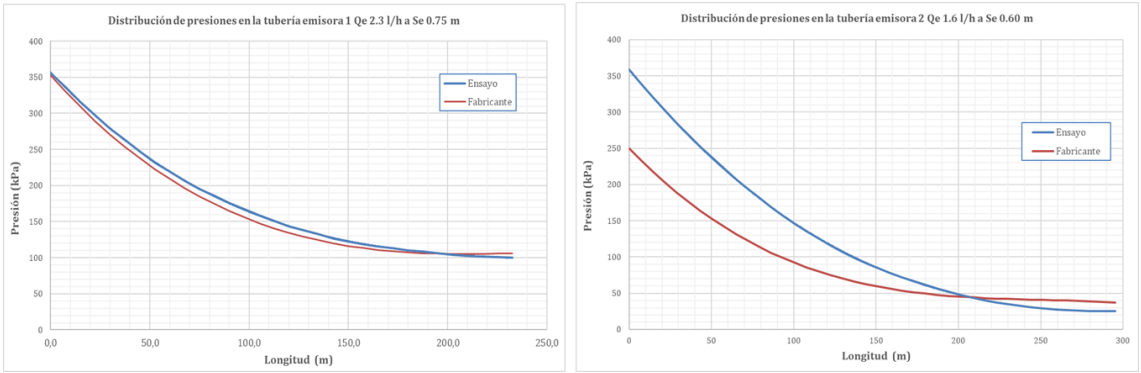
3. Resultados

Los ensayos con las tuberías emisoras de la El método de ensayo propuesto para determinar la longitud máxima de laterales se llevó a cabo en el Laboratorio de Riegos de la Universitat Politècnica de València. Se ensayaron dos tuberías emisoras con las características técnicas descritas en la Tabla 1.

Tabla muestran la distribución de presión según la longitud máxima ensayada para cada una de las tuberías emisoras, se compara con los datos suministrados por los fabricantes en sus catálogos técnicos. Estos resultados son el promedio obtenido después de tres repeticiones del ensayo descrito en el apartado anterior, garantizando la presión mínima del emisor.

3.1. Distribución de presiones según longitud máxima ensayada

Tras el ensayo de la tubería emisora 1 la longitud máxima obtenida es de Lmax = 232,5 m para una presión de suministro de 356 kPa y una presión mínima del emisor 99,90 kPa, lo que supone una variación de presión de 256.1 kPa (Tabla 4 Apéndice A). En la Figura 5 (a) se muestran los resultados del ensayo frente a los datos aportados por el fabricante, se observa la distribución de las presiones a lo largo de la tubería. En este caso los datos del fabricante y del ensayo coinciden ya que el fabricante los ha incorporado a sus hojas técnicas.



(**a**) (**b**)

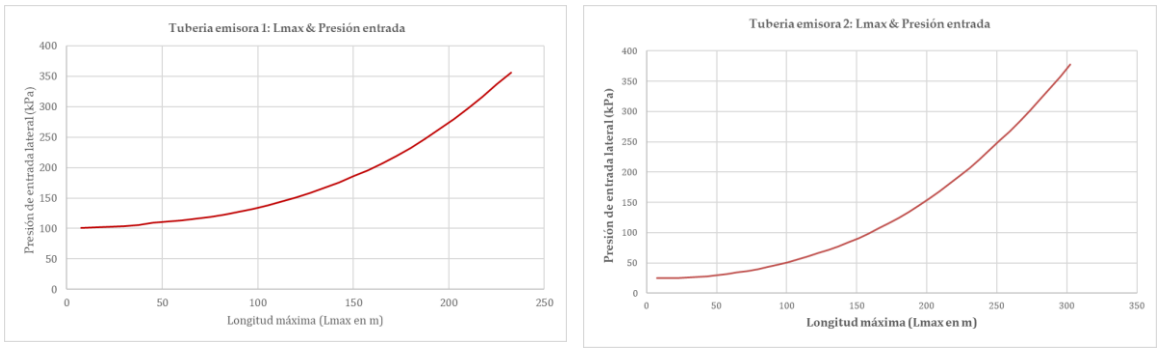
***Figura 7**. Distribución de presiones a lo largo de la tubería emisora. Comparativa entre los datos facilitados por el fabricante y el ensayo (a) tubería emisora 1 (b) tubería emisora 2.*

Tras el ensayo de la tubería emisora 2 la longitud máxima obtenida es de Lmax = 295,2 m para una presión de suministro de 357,7 kPa y una presión mínima del emisor 25,13 kPa, lo que supone una variación de presión de 332,57 kPa (Tabla 5 Apéndice A).

En la Figura 5 (b) se muestran los resultados del ensayo frente a los datos aportados por el fabricante, se observa la distribución de las presiones a lo largo de la tubería. En este caso el fabricante muestra la longitud máxima para presiones máximas de entrada de 250 kPa a una presión mínima de 40 kPa, mientras los límites del emisor son 350 a 25 kPa. Con estos datos el fabricante indica una longitud máxima superior a la obtenida.

3.2. Graficas de Longitud máxima en función de la presión de entrada en el lateral

A nivel de diseño es más útil mostrar los datos obtenidos representando la longitud máxima en función de la presión de entrada, garantizando al final del lateral siempre la presión mínima del emisor.



(**a**) (**b**)

Figura 6. Longitud máxima en función de la Presión entrada al lateral del riego; (**a**) tubería emisora 1 (**b**) tubería emisora 2.

4. Discusión

Los ensayos realizados sobre las tuberías emisoras sin pendiente han permitido determinar la longitud máxima de los laterales en función de su presión de entrada, garantizando que al final de la tubería se mantenga la presión mínima requerida para el correcto funcionamiento de los emisores. El protocolo de ensayo presentado para determinar la longitud máxima es sencillo de implementar en cualquier laboratorio y permite a los fabricantes establecer las longitudes máximas de tubería para terreno plano, y representar la distribución de presiones a lo largo de la misma.

En la tubería emisora 1, el fabricante incorpora los resultados empíricos del ensayo en sus hojas técnicas y conduce a un diseño adecuado por parte del proyectista, mientras en la tubería emisora 2 el fabricante muestra una longitud errónea que conducirá a un diseño inadecuado que puede ocasionar problemas de funcionamiento real en la subunidad de riego localizado.

Los resultados de este estudio resaltan la importancia de realizar pruebas de laboratorio en condiciones reales antes de establecer los parámetros finales de diseño y establecer protocolos de ensayo unificados en la normativa existente.

La distribución discreta de caudal a lo largo de la conducción afecta a las pérdidas de carga localizadas de cada emisor y por tanto a su longitud máxima. Para sistemas de riego localizado es importante considerar la presión mínima requerida por el emisor, la presión disponible a la entrada del lateral y el espaciamiento entre goteros que condicionará estas pérdidas de carga y con ello su longitud máxima.

Author Contributions: Conceptualization, Balbastre I; Palau C.V.; Manzano; methodology, Balbastre, I.; software, Balbastre, I.; validation, González-Pavón, C and Manzano-Juárez, J; investigation, Balbastre I; data curation, Balbastre I.; writing—original draft preparation, Palau C.V.; Balbastre I; writing—review and editing, Balbastre I; Palau C.V; supervision, Balbastre I; Palau C.V; Manzano-Juárez, J; González-Pavón, C.

Funding: This research received no external funding.

Conflicts of Interest: The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Apéndice A

Tabla 4. Longitud máxima obtenida para la tubería emisora 1.

Etapas	Q1 (l/h)	Q2 ajustada (l/h)	P1 (kPa)	P2 ajustada (kPa)	L (m)	□□P (kPa)
1	22,40	0,00	101,00	99,90	7,5	0,00
2	46,20	22,90	102,00	100,80	15,0	0,01
3	69,30	45,80	103,00	101,80	22,5	0,04
4	92,40	69,20	104,00	102,70	30,0	0,08
5	115,50	92,40	106,00	103,90	37,5	0,14
6	138,60	115,50	109,00	106,00	45,0	0,23
7	161,70	138,90	111,00	108,50	52,5	0,36
8	184,70	161,90	113,00	110,50	60,0	0,54
9	207,80	184,70	116,00	113,00	67,5	0,75
10	230,80	207,40	119,00	115,90	75,0	1,02
11	253,80	229,90	123,00	118,60	82,5	1,33
12	276,70	252,60	127,00	122,80	90,0	1,71
13	299,70	274,90	132,00	126,30	97,5	2,14
14	322,60	297,40	138,00	132,30	105,0	2,64
15	345,40	319,90	144,00	137,70	112,5	3,21
16	368,30	342,40	151,00	143,70	120,0	3,85
17	391,10	365,10	159,00	151,20	127,5	4,57
18	413,90	387,90	167,00	158,80	135,0	5,36
19	436,60	410,00	176,00	167,20	142,5	6,24
20	459,30	432,30	186,00	176,10	150,0	7,21
21	482,00	454,00	195,00	186,00	157,5	8,26
22	504,60	477,00	207,00	195,00	165,0	9,42
23	527,20	498,60	219,00	206,50	172,5	10,67
24	549,70	520,80	232,00	219,00	180,0	12,06
25	572,20	543,10	247,00	231,70	187,5	13,51
26	594,60	565,80	263,00	247,00	195,0	15,06
27	617,10	588,30	279,00	263,00	202,5	16,72
28	639,40	610,70	297,00	278,80	210,0	18,49
29	661,80	633,30	316,00	297,10	217,5	20,38
30	684,10	656,30	337,00	316,00	225,0	22,39
31	706,40	678,80	356,00	337,00	232,5	24,51

Tabla 5. Longitud máxima obtenida para la tubería emisora 2.

Etapas	Q1 (l/h)	Q2 ajustada (l/h)	P1 (kPa)	P2 ajustada (kPa)	L (m)	□□P (kPa)
1	18,7	0,0	25,11	25,00	7,2	0,11
2	37,1	18,7	25,26	25,13	14,4	0,24
3	55,3	37,1	25,43	25,28	21,6	0,39
4	73,2	55,3	26,10	25,69	28,8	0,8
5	92,4	73,2	27,15	26,42	36,0	1,53
6	112,6	92,4	28,34	27,38	43,2	2,49
7	132,0	112,6	30,24	28,81	50,4	3,92
8	152,3	132,0	32,11	30,46	57,6	5,57
9	172,3	152,3	34,36	32,41	64,8	7,52
10	192,7	172,3	36,87	34,64	72,0	9,75
11	213,1	192,7	39,92	37,28	79,2	12,39
12	233,8	213,6	43,34	40,31	86,4	15,42
13	254,0	233,8	47,11	43,71	93,6	18,82
14	274,2	253,8	51,33	47,52	100,8	22,63
15	294,4	274,1	55,94	51,73	108,0	26,84
16	314,4	294,2	61,07	56,40	115,2	31,51
17	334,5	314,2	66,46	61,43	122,4	36,54
18	354,4	334,4	71,87	66,65	129,6	41,76
19	374,6	354,4	77,51	72,08	136,8	47,19
20	394,7	374,6	84,00	78,04	144,0	53,15
21	414,6	394,8	91,02	84,53	151,2	59,64
22	434,4	414,6	98,59	91,56	158,4	66,67
23	454,5	434,3	106,72	99,14	165,6	74,25
24	474,1	454,5	115,42	107,28	172,8	82,39
25	493,9	474,1	124,72	116,00	180,0	91,11
26	513,6	494,0	134,62	125,31	187,2	100,42
27	533,0	513,6	145,09	135,20	194,4	110,31
28	552,6	533,0	156,20	145,70	201,6	120,81
29	572,1	552,7	167,98	156,84	208,8	131,95
30	591,4	572,2	180,32	168,58	216,0	143,69
31	610,6	591,4	193,30	180,94	223,2	156,05
32	630,1	610,7	206,98	193,96	230,4	169,07
33	649,4	630,1	221,26	207,61	237,6	182,72
34	668,5	649,3	236,23	221,92	244,8	197,03
35	687,4	668,3	251,92	236,92	252,0	212,03
36	705,8	687,5	267,62	252,27	259,2	227,38
37	724,8	705,7	284,35	268,31	266,4	243,42
38	742,9	725,0	301,67	284,99	273,6	260,1
39	761,0	742,9	319,71	302,35	280,8	277,46
40	779,2	761,0	338,47	320,41	288,0	295,52
41	796,8	779,1	357,69	339,05	295,2	314,16
42	814,9	797,0	377,69	358,37	302,4	333,48

Referencias

1. ISO 9261.Equipos de riego. Emisores y tuberías emisoras. 2004
2. Blasius, H. (in German). Forshhungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesen. 1913.vol. 131 (1).
3. Montalvo López, T. Riego localizado: Diseño de instalaciones. 2007. vol. 2a, p. 256.
4. Benítez, L.; Juana, L. Pérdidas de carga localizadas en ramales de riego por goteo, aspectos a considerar en su determinación. Proceedings XXIX Congreso Nacional de Riegos, Albacete. España, 2012.
5. Christiansen J. E. Irrigation by Sprinkling. 1942. Vol. 4. University of California Agricultural Experiment Station Bulletin.
6. Howell T. A.; Barinas, F. A. Pressure Losses Across Trickle Irrigation Fittings and Emitters. Trans ASABE 1980. Vol. 23(4), 928–0933. DOI: 10.13031/2013.34690.
7. Al-Amoud, A.I. Significance of Energy Losses Due to Emitter Connections in Trickle Irrigation Lines. J. Agr. Eng. Res. 1995. Vol. 60 (1), 1–5. DOI: 10.1006/JAER.1995.1090.
8. Juana, L.; Rodríguez-Sinobas, L.; Losada, A. Determining Minor Head Losses in Drip Irrigation Laterals. Methodology. J. Irrig. Drainage Eng-ASCE 2002. Vol. 128(6), pp. 376–384. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:6(376).
9. Yildirim, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. Irrig. Drain. 2007. Vol. 56 (4) 399–421. DOI: 10.1002/IRD.303.
10. Neto, O. R.; de Miranda J. H.; Frizzone J. A.; Workman S. R. Local Head Loss of Non-Coaxial Emitters Inserted in Polyethylene Pipe. Trans ASABE 2009, vol. 52 (3) 729–738. DOI: 10.13031/2013.27394.
11. Arviza Valverde, J. Perdidas de carga singulares por la conexión de emisores en laterales de riego localizado. 1992.
12. Al-Amoud, A. I.; Mattar, M. A.; Ateia, M. I. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance. Span. J. Agric. Res. 2014. Vol. 12(3), 580–593. DOI: 10.5424/sjar/2014123-4990.
13. Bagarello, V; Ferro, V; Provenzano, G; Pumo, D. Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines. J. Irrig. Drainage Eng-ASCE 1997. Vol. 123 (1). 1–7. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:1(1).

Estimación del coeficiente de cultivo dual del ajo en un entorno semiárido utilizando el modelo SIMDualKc.

Martínez – López J.A.[1]*, Domínguez A.[1], Paredes P.[2], Pardo J.J.[1], Martínez – López H.[1], Montoya F.[3], Martínez-Romero A.[1], López-Urrea R[4].

[1] Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla La Mancha (UCLM) and Teledetección, Agronomía y Riego, UCLM, Unidad Asociada al CSIC por el CIDE, 02071 Albacete, España. josea.martinez@uclm.es

[2] LEAF – Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Center, Associate Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomía (ISA). Universidad de Lisboa. Tapada da Ajuda 1349-017. Lisboa. Portugal. pcsparedes@gmail.com

[3] Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP), Parque Empresarial Campollano, 2ª Avenida–Nº 61, 02007 Albacete, España; fms.itap@dipualba.es

[4] Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA, Carretera CV-315, km 10.7, 46113-Moncada, Valencia, España. lopez-urrea@csic.es

* Correspondence: josea.martinez@uclm.es

Abstract: La variabilidad climática ha intensificado los desafíos en la gestión del agua en la agricultura, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde la escasez de agua unida a esta variabilidad climática puede comprometer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Modelos como SIMDualKc, que simulan el balance hídrico del suelo a partir de datos climáticos, edáficos y del cultivo, son fundamentales para mejorar la eficiencia en el uso del agua. Estos modelos permiten estimar con detalle las necesidades hídricas del cultivo, ajustando las prácticas de riego según las condiciones meteorológicas reales, la humedad del suelo y las etapas de desarrollo del cultivo, lo que reduce el riesgo de riego excesivo o insuficiente. Este estudio tuvo como objetivo estimar los valores del coeficiente de cultivo dual ($K_{cb} + K_e$) del ajo tras la calibración y validación del modelo SIMDualKc para las condiciones de Castilla-La Mancha, utilizando la evapotranspiración real del cultivo ($ET_{c\ act}$) medida con lisímetros. La calibración se realizó con datos de 2017, mientras que para la validación se empleó un conjunto de datos independiente de 2021. El modelo mostró una alta precisión en la simulación de la $ET_{c\ act}$ tanto en la calibración como en la validación, con errores de estimación bajos (RMSE < 0.5 mm día^{-1}), representando menos del 15% de la ET_c promedio real y una alta eficiencia del modelo (> 90%). La variación entre los valores observados y simulados se mantuvo por debajo del 10% a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Los valores del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) calibrados del cultivo fueron 0.15, 0.95 y 0.50 para las etapas inicial, intermedia y final de la temporada, respectivamente. Los resultados indicaron que la evaporación de agua del suelo fue bastante baja después de la formación del bulbo, representando solo el 13% de la $ET_{c\ act}$, mientras que en la etapa inicial de desarrollo constituyó el principal componente de la $ET_{c\ act}$ (92%). Aunque SIMDualKc es un modelo relativamente complejo y no adecuado para usuarios sin experiencia, los resultados obtenidos son prometedores, lo que indica su idoneidad para optimizar la programación del riego del ajo en condiciones semiáridas. Del mismo modo, modelos de alta precisión como este pueden ser valiosos para refinar modelos más

simples, facilitando que un mayor número de usuarios implemente una programación del riego adecuada.

Palabras clave: programación de riegos, sostenibilidad, escasez de agua, variabilidad climática, evapotranspiración del cultivo.

1. Introducción

El ajo (*Allium sativum L.*) es un cultivo de gran importancia económica y nutricional a nivel mundial. Dada su amplia utilización y demanda en el mercado, la optimización de la producción de ajo es crucial para asegurar un suministro estable y sostenible. Uno de los factores críticos en su cultivo es la disponibilidad de agua, ya que influye directamente tanto en el rendimiento como en la calidad del producto [1]. La eficiencia en el uso del agua se ha convertido en un desafío cada vez más importante en la agricultura, especialmente en regiones con recursos hídricos limitados o sujetas a gran variabilidad climática, como la región mediterránea. Además, esta variabilidad climática plantea una amenaza creciente para esta región, siendo considerada como "punto caliente" dentro del cambio climático (CC) [2] . Este CC aumentará la variabilidad climática con aumentos en la frecuencia e intensidad de las sequías, temperaturas más elevadas y alteraciones en los patrones de precipitación [2–4], haciendo cada vez más difícil el manejo del riego en cultivos como el ajo. El déficit hídrico es un factor clave que afecta a la productividad de este cultivo, impactando negativamente en su crecimiento y desarrollo, lo que provoca pérdidas de rendimiento y empeora su calidad final, así como su rentabilidad [1,5]. El déficit hídrico durante las etapas fenológicas más críticas, como la formación del bulbo, puede reducir el tamaño y peso de los dientes impactando directamente en su calidad comercial [6]. Por ello, la implementación de estrategias de riego es crucial para minimizar estos efectos optimizando el uso del agua sin comprometer su producción y calidad. Aunque el coste del agua representa solamente un 4% de los costes totales de producción, es fundamental usar el agua de forma más eficiente para garantizar la sostenibilidad del cultivo a largo plazo [7].

En la zona mediterránea, las condiciones climáticas son favorables para el cultivo del ajo. España es uno de los mayores productores a nivel mundial ocupando el 5º lugar en cuanto a superficie y el 9º en producción [8], donde Castilla – La Mancha (CLM) es la región más importante a nivel productivo. Según datos recientes, CLM produce el 64% de la producción nacional de ajo, cultivando cerca de 21,000 ha anualmente (70% de la superficie nacional del cultivo), de las cuales el 68% son de regadío. El cultivo del ajo predomina en provincias como Albacete, Ciudad Real y Cuenca, con un rendimiento medio de 10.2 toneladas ha^{-1} [9]. La calidad del ajo de

CLM, particularmente el Ajo Morado de las Pedroñeras, es internacionalmente reconocida, ya que cuenta con una Indicación Geográfica Protegida.

Con el objetivo de optimizar la toma de decisiones de riego, se han desarrollado varias herramientas, como los modelos de programación de riego, los cuales tienen en cuenta los diversos factores que influyen en los requisitos de agua y riego de los cultivos [10–13]. Estos modelos estiman la demanda hídrica del cultivo a partir de parámetros climáticos, edáficos y fisiológicos, facilitando de forma precisa la toma de decisiones que aseguren la sostenibilidad de los sistemas agrarios. Además, estos modelos no se limitan solo a nivel de parcela, sino que también juegan un importante papel en la planificación y gestión hidrológica a nivel regional [14]. Su aplicación permite una mejor distribución de los recursos hídricos disponibles, de forma equitativa, ayudando a mitigar el impacto de la escasez de agua en regiones con una alta demanda de agua por parte de la agricultura [7,15–17]. En este contexto el modelo SIMDualKc [13] se ha establecido como una herramienta fiable para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y el balance de agua en el suelo, usando la metodología del coeficiente de cultivo dual ($K_{c\ dual}$) [18] que divide la evapotranspiración entre sus dos componentes, uno relacionado con el cultivo, transpiración, y el otro relacionado con la evaporación de agua del suelo. SIMDualKc destaca por su habilidad para simular de forma precisa el estrés hídrico en la planta, así como su impacto en el rendimiento [17,19,20], siendo una buena opción para llevar a cabo una programación de riegos eficiente especialmente en cultivos de alto valor económico, como es el caso del ajo.

El objetivo de este estudio es estimar los coeficientes de cultivo dual del ajo después de calibrar y validar el modelo SIMDualKc para las condiciones de CLM a partir de medidas lisimétricas de la $ET_{c\ act}$. Una vez calibrado y validado, el modelo puede ser usado para estudiar programaciones de riego alternativas para el cultivo del ajo, con el objetivo de ahorrar agua y asegurar la sostenibilidad del cultivo en un contexto de escasez de agua.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la zona de estudio y experimentos de campo

Las parcelas experimentales se ubican dentro de la Unidad Hidrogeológica de la Mancha Oriental (HUEM) en CLM, España. Los experimentos de campo se realizaron en 2017 y 2021 en un cultivar de Ajo Morado de Las Pedroñeras en el Centro Integrado de Formación Profesional en Aguas Nuevas (longitud 1º 53' 58'' W, latitud 38º 56' 42'' N, a una altitud de 695 m sobre el nivel del mar). El clima de esta zona se clasifica como semiárido frío (Bsk)según la clasificación de Köppen. La precipitación media anual es de 345 mm, mientras que la evapotranspiración de referencia

calculada con la ecuación de FAO Penman-Monteith [21] es de aproximadamente 1309 mm anuales. El suelo se clasificó como Petrocálcico-Xerochrepts con una textura franco-arcillosa (35% arena, 35% limo, y 30% arcilla) limitado por un horizonte petrocálcico, que tiene una profundidad media de 0.4 m. El suelo es alcalino (pH = 8.7) con un alto nivel de carbonatos activos. El riego se aplicó mediante un sistema de riego por goteo con un marco de riego de 0.5 × 0.5 m. Se colocaron ramales de goteo entre las hileras de cultivo equipados con goteros autocompensantes de un caudal nominal de 3.8 l h^{-1} con goteros cada 0.5 m. Esta configuración permite un solape total entre los bulbos húmedos, mojando completamente la superficie del suelo, al igual que ocurre si se emplease un sistema de riego por aspersión (comúnmente utilizado en la zona para este cultivo). Sin embargo, al tratase de parcelas de pequeñas dimensiones se optó por este sistema que además permite reducir las pérdidas por evaporación y arrastre, tal y como se ha realizado en otros estudios anteriores en la zona [1,22]. Durante las pruebas de campo, la programación diaria del riego se basó en un balance hídrico de la zona radicular siguiendo la metodología FAO56 [21]. Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica "Albacete", perteneciente al Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de CLM (SIAR-CLM) [23] , ubicada en el recinto experimental.

El conjunto de datos empleados para la calibración del modelo SIMDualKc correspondió a la campaña 2017, durante el último año experimental de los estudios realizados por Lellis et al. (2022) [1]. En 2016 se instaló un mini-lisímetro de pesada continua para validar los valores de K_c propuestos por Fabeiro et al. (2003) [6], que originalmente se derivaron a partir de las lecturas de sondas de humedad del suelo. El lisímetro constaba de tres componentes principales [24]: a) un tanque de suelo reconstruido, de 0.95 m de longitud, 0.55 m de anchura y 0.50 m de profundidad, con una superficie total de 0.52 m^2 y un peso aproximado de 0.3 Mg (donde se empleó la misma densidad de planta que en el resto de la parcela); b) un depósito cilíndrico de acero de fondo curvo situado debajo del depósito de suelo, diseñado para recoger y medir el agua drenada, con una capacidad de 4 l; y c) un sistema de pesaje para supervisar los cambios en el balance hídrico tanto en el suelo como en los tanques de drenaje, que consta de cuatro células de carga para el contenedor de suelo y una célula de carga para el tanque de drenaje. La masa del lisímetro y el agua de drenaje se registraron utilizando un datalogger (CR300, Campbell Scientific Ltd., Logan, UUT, EE. UU.), que registró los cambios de peso del lisímetro y de las células de carga del drenaje (Modelo 300, UTILCELL, S.A., Barcelona, España) con una frecuencia de 1 segundo. Los datos de masa y drenaje se almacenaron como promedios de 1 min, 10 min, 30 min, horarios y diarios. El sistema permitió la medida de ET_c y drenaje con una precisión de 0.03 mm y 0.002

mm de lámina de agua, respectivamente. En 2020, se instaló otro mini-lisímetro con idénticas especificaciones técnicas pero diferentes dimensiones (1.5 × 0.69 × 0.5 m) en una parcela adyacente. Este mini- lisímetro tenía una superficie de 1.04 m² y un peso total de 0.9 Mg. El tanque de drenaje tenía una capacidad de 10 L. La precisión en la medida de la masa del mini - lisímetro y el peso del tanque de drenaje fue la misma que la del lisímetro utilizado en 2017. La ET_c se determinó de acuerdo con Lellis et al. 2022 [1], donde se realiza un balance entre las ganancias (entradas: lluvia + riego) y las pérdidas de peso (salidas: evapotranspiración + drenaje).

En la Tabla 1 se presentan las fechas de las principales etapas de desarrollo fenológico del cultivo [25], las cantidades netas de riego, y la precipitación efectiva recibida en cada etapa y a lo largo de todo el ciclo durante los dos años experimentales. Las cantidades netas de riego y precipitación efectiva se determinaron a partir de las variaciones de peso del lisímetro después de cada evento de riego o lluvia respectivamente. No obstante, se usó un contador para controlar la cantidad de riego aplicada. Se empleó el dato del contador para comprobar que el aporte de agua de riego en este caso detectado por el lisímetro (neto) no fuese superior a la cantidad que descargó el sistema de riego (bruto) teniendo así una idea clara de la eficiencia del sistema de riego en cada evento. El lisímetro no detectó drenaje ya que la programación de riego se realizó con el objetivo de evitar o minimizar las perdidas por percolación profunda, aunque el modelo si contempla el drenaje.

Tabla 3: Desarrollo del cultivo, riego neto, precipitación efectiva y agua total aplicada.

	Inicio	Fin	Fechas	I_N (mm)	P_e (mm)	TWS (mm)
2017						
Inicial	00	14	16 Ene. – 17 Mar.	0	128	128
Desarrollo	14	41	18 Mar. – 05 May.	67	29	96
Bulbificación	41	47	06 May. – 07 Jun.	136	16	152
Maduración	47	49	08 Jun. – 26 Jun.	104	1	105
2021						
Inicial	00	14	30 Ene. – 05 Abr.	72	37	110
Desarrollo	14	41	06 Abr. – 24 May.	111	67	178
Bulbificación	41	47	25 May. – 14 Jun.	84	13	97
Maduración	47	49	15 Jun. – 01 Jul.	46	31	78

00: Semilla seca; 14: 4ª hoja claramente visible; 41: Las bases de las hojas comienzan a engrosarse o extenderse; 47: 70% de la longitud y el diámetro esperados del bulbo alcanzados; 49: parte superior del bulbo seco; Crecimiento completo; I_N: Riego neto; P_e: Precipitación efectiva; TWS: Agua total suministrada al cultivo.

2.3. SIMDUALKc

El modelo SIMDualKc lleva a cabo un balance de agua en el suelo a escala diaria, estimando la evapotranspiración del cultivo. Se basa en la metodología del coeficiente de cultivo dual [18] que considera la transpiración del cultivo (K_{cb}) y la evaporación del suelo (K_e) por separado.

El modelo comienza calculando la evapotranspiración del cultivo (ET_c) para unas condiciones no limitantes como el producto de la ET_o por la suma de los valores de los coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) y de evaporación (K_e), expresados en la siguiente ecuación: $ET_c = (K_{cb} + K_e)\ ET_o$. A partir de esta ecuación, se derivan la transpiración máxima ($T_c = K_{cb}ET_o$) y la evaporación del suelo ($E_s = K_eET_o$). El cálculo de K_e considera la evaporación directa de la superficie del suelo, influenciada por el contenido de agua en la capa superficial del suelo y factores como la fracción de suelo cubierta por vegetación (f_c) y la fracción de suelo mojado por riego y/o precipitación (f_w). K_{cb} representa principalmente la transpiración del cultivo, ajustada a las condiciones climáticas locales, de humedad relativa mínima (RH_{min}) y velocidad del viento (u_2).

Posteriormente, el modelo ajusta la evapotranspiración para tener en cuenta las condiciones de disponibilidad de agua en la zona radicular, calculando un coeficiente de estrés hídrico (K_s) que afecta a la ET_c resultando en la evapotranspiración actual del cultivo ($ET_{c\ act}$). Esta se determina en función del agua disponible en el suelo (ASW) en relación con el agua fácilmente utilizable (RAW) la cual es fracción del agua total disponible (TAW). El RAW es calculada usando el límite de agotamiento del agua en el suelo para que el cultivo no sufra déficit hídrico (p). Cuando el ASW es mayor que el RAW, la transpiración no está limitada por el agua y se considera que no hay déficit hídrico (K_s=1). De lo contrario, $K_s < 1.00$ y se produce estrés por déficit hídrico, por tanto, la evapotranspiración actual del cultivo es menor que la ET_c. Entonces la $ET_{c\ act}$ se calcula como $(K_sK_{cb} + K_e)\ ET_o$. SIMDualKc realiza entonces un balance hídrico diario en la zona radicular, considerando los aportes de agua al sistema, que incluyen precipitación efectiva (P_e) y riego (I), y las salidas, representadas por la evapotranspiración real ($ET_{c\ act}$) y la percolación profunda (DP). Para determinar I existen varias opciones; la primera es evaluar un calendario de riego predeterminado; en la segunda opción SIMDualKc puede llevar a cabo varias estrategias de riego con diferentes niveles de estrés o de riego para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo [17] . La DP se puede estimar a través de un procedimiento simplificado, que considera que toda el agua del suelo por

encima del TAW percola o a través de ecuaciones paramétricas que dependen de las características del suelo. El modelo también considera el ascenso capilar (CR) de las capas freáticas poco profundas y la escorrentía utilizando parámetros de número de curva [26].

El manejo de SIMDualKc se basa en datos meteorológicos diarios, incluyendo ET_o y P_e; las características del suelo, como el agua total disponible (TAW) o las características de retención del agua del suelo empleadas para su determinación, como el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente, los parámetros de la capa de evaporación que incluyen profundidad (Z_e, m), el agua fácilmente evaporable (REW, mm) y el agua evaporable total (TEW, mm); características del cultivo, como K_{cb} para diferentes etapas de crecimiento, p, altura del cultivo (h, m) y f_c; datos de riego, como laminas ,fechas de riego, y f_w; y las condiciones en las que se encuentra la superficie del suelo, considerando el uso de mantillo y/o cobertura activa del suelo. El modelo SIMDualKc ha sido ampliamente validado y aplicado en diversas regiones agrícolas a nivel mundial, demostrando su robustez bajo diferentes condiciones climáticas y de suelo. El modelo ha sido aplicado con éxito en China [27], Portugal [17], Brasil[28], y Uruguay [29], entre otros.

2.4. Calibración/validación del modelo

El procedimiento de calibración de SIMDualKc tuvo como objetivo obtener los parámetros no observados relacionados con el cultivo (K_{cb} y p) y con la evaporación del suelo (TEW, REW y Ze). Inicialmente se consideraron los parámetros por defecto según Pereira et al., 2021 [30], mientras que los parámetros de evaporación del suelo se basaron en las características texturales y de retención de agua del suelo. Posteriormente se realizaron sucesivamente varias simulaciones con el objetivo de minimizar los errores entre los valores observados y simulados de la $ET_{c\ act}$ del ajo a partir de los datos obtenidos durante la campaña de 2017.

Para evaluar la precisión del modelo, se utilizó un conjunto de varios indicadores estadísticos. Se realizó una regresión forzada por el origen, comparando los valores simulados y observados, obteniendo el coeficiente de regresión (b_o) con el objetivo de percibir las sobre- o sub- estimaciones del modelo. Un valor cercano a 1 para b_o indica que la covarianza es similar a la varianza.

Además, se emplearon otros indicadores de calidad del modelo, como la eficiencia del modelo (EF) [31] que compara la varianza residual con la de los datos medidos, considerándose aceptable cuando es mayor que 0.

También se analizaron indicadores de error residual, como la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) [32], que mide la magnitud media de las diferencias entre los valores simulados y observados, con un criterio establecido del ±20% del valor máximo observado. El error cuadrático medio normalizado (NRMSE) [32] expresa este error en relación con el valor medio observado, clasificándolo como excelente (<10%), bueno (10-20%), aceptable (20-30%) y malo (>30%) [33]. La validación consistió en usar los parámetros calibrados con un set de datos independiente, en este caso el año 2021 comparando la $ET_{c\ actual}$ medida con el lisímetro con la calculada por SIMDUALKc usando para la comparativa los mismos indicadores empleados para la calibración.

3. Resultados y discusión

3.1. Calibración y validación del modelo

Tras una adecuada calibración y validación del modelo, este demostró su capacidad para estimar adecuadamente la dinamiza diaria de la $ET_{c\ act}$ del ajo. Los valores de los parámetros del cultivo y de evaporación antes y después de la calibración se presentan en la Tabla 2.

La calibración (2017), condujo al ajuste de varios de los parámetros del cultivo, el ligero descenso del valor de $K_{cb\ end}$ (0.50 en lugar del 0.60 predeterminado), y el ligero descenso del para metro de evaporación del suelo REW (8.00 en lugar de 10.00 mm).

En cuanto a los coeficientes de cultivo único (K_c), los valores obtenidos durante la etapa inicial son similares a los reportados por Chaterlan et al. (2011) y Allen et al. (1998) [21,34], mientras que los valores obtenidos en el presente estudio durante la etapa intermedia son ligeramente superiores, aunque aún inferiores a los reportados por Villalobos et al. (2004) [35] . Los valores finales de K_c son ligeramente inferiores a los reportados por estos autores debido al contenido de humedad de los bulbos en el momento de la cosecha.

Hay pocos estudios que proporcionen datos de $K_{cb\ ini}$ para el ajo. El valor obtenido en este estudio ($K_{cb\ ini}$ = 0.10) es similar al reportado por Bryla et al. (2010) [36] ($K_{cb\ ini}$ = 0.16). El coeficiente basal de cultivo calibrado para la etapa de mitad de temporada ($K_{cb\ mid}$ = 0.95) coincide con los valores propuestos por (Pereira et al. (2021) y Bryla et al. (2010) [30,36] y es ligeramente superior a la obtenida por Johnson et al. (2012) [37] . Sin embargo, para la etapa final ($K_{cb\ final}$ = 0,5), el valor es ligeramente inferior al reportado por Pereira et al. (2021) [30] , ya que el cultivo se cosechó con menor contenido de humedad después de completar su fase final de crecimiento. Sin embargo, este valor es superior al reportado por Bryla et al. (2010) [36] , quienes cortaron el riego 20 días antes de la cosecha, destacando la gran

influencia del contenido de humedad de los bulbos en el momento de la cosecha. Este efecto se observó en 2021, donde los valores finales de K_c observados y simulados fueron muy similares. En 2017, los eventos finales de riego incrementaron la componente evaporativa (Figura 1).

Los cambios llevados a cabo en la K_c y los parámetros de evaporación del suelo mejoraron la precisión del modelo, como lo demuestra una reducción en RMSE de 0.3 a 0.2 mm día^{-1} y NRMSE de 12.2% a 9.4% (Tabla 3). El bajo valor de $K_{cb\ end}$ se debió a una etapa final más larga, que llevo a una mayor senescencia del cultivo, cosechándose los bulbos con un contenido de humedad más bajo en el momento de la cosecha, lo que influyó en las necesidades hídricas del cultivo en el final de campaña. Además, los parámetros TEW y REW se establecieron inicialmente de acuerdo con la textura del suelo, pero luego se ajustaron durante la calibración del modelo para minimizar las diferencias entre los valores observados y simulados de $ET_{c\ act}$ (Tabla 2). Este ajuste fue crucial para simular mejor el agua disponible para la evaporación a lo largo del ciclo del cultivo, mejorando la precisión del modelo. La EF aumentó de 0.96 a 0.98, lo que indica una mejora en las predicciones del modelo.

Durante la validación (2021), se usaron los mismos valores de los parámetros obtenidos en la calibración excepto por un ligero ajuste en el valor de $K_{cb\ end}$ se fijó en un valor de 0.6 debido a una menor senescencia del cultivo. El modelo siguió manteniendo valores altos de EF (0.96). Sin embargo, en 2021, el NRMSE alcanzó un valor de 13.7%, superior al de la calibración, lo que refleja una mayor variabilidad en las estimaciones de ET_c (519.7 mm observados vs. 487.9 mm simulados), lo que indica una ligera subestimación por parte del modelo como refleja b_o (Tabla 3).

En general, el modelo demostró un buen comportamiento, con errores dentro de los rangos aceptables y un buen ajuste entre los valores observados y simulados. La regresión forzada al origen arrojó valores del coeficiente b_o entre 0.91 y 1.03 lo que sugiere una fuerte relación lineal entre los conjuntos de datos observados y simulados (Tabla 3). Estos resultados apoyan la aplicabilidad del modelo en condiciones climáticas y de riego similares.

Tabla 4: Valores predeterminados y calibrados de los parámetros no observados del modelo SIMDualKc.

	Parámetros del cultivo							Parámetros de evaporación del suelo	
Parámetros	**$K_{cb\ ini}$**	**$K_{cb\ mid}$**	**$K_{cb\ end}$**	**$p_{in\ i}$**	**$p_{c\ v}$**	**p_{mid}**	**p_{end}**	**REW (mm)**	**TEW (mm)**
Predeterminado (2017)	0.1	0.95	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	10	25
Calibrado (2017)	0.1	0.95	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	8	25
Validación (2021)	0.1	0.95	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	8	25

Kc: Coeficiente de cultivo al inicio, mitad y fin de campaña; REW: Agua fácilmente evaporable; TEW: Agua Evaporable Total; p: Fracción de agotamiento de agua del suelo para que el cultivo no sufra estrés por déficit hídrico.

Tabla 5: Indicadores de bondad de ajuste del modelo SIMDUALKc para ajo en CLM

	b_o	**RMSE (mm día $^{-1}$)**	**NRMSE (%)**	**EF**	**$ET_{c\ obs}$ (mm)**	**$ET_{c\ sim.}$ (mm)**
Predeterminado (2017)	1.06	0.3	12.18	0.96	458.5	502.0
Calibrado (2017)	1.04	0.2	9.39	0.98	458.5	492.7
Validación (2021)	0.91	0.5	13.66	0.96	519.7	487.9

b_o: Coeficiente de regresión; RMSE: Error cuadrático medio; NRMSE: Error cuadrático medio normalizado; EF: Eficiencia del modelo; $ET_{c\ obs}$: Evapotranspiración del cultivo observada; $ET_{c\ simulated}$: Evapotranspiración del cultivo simulada.

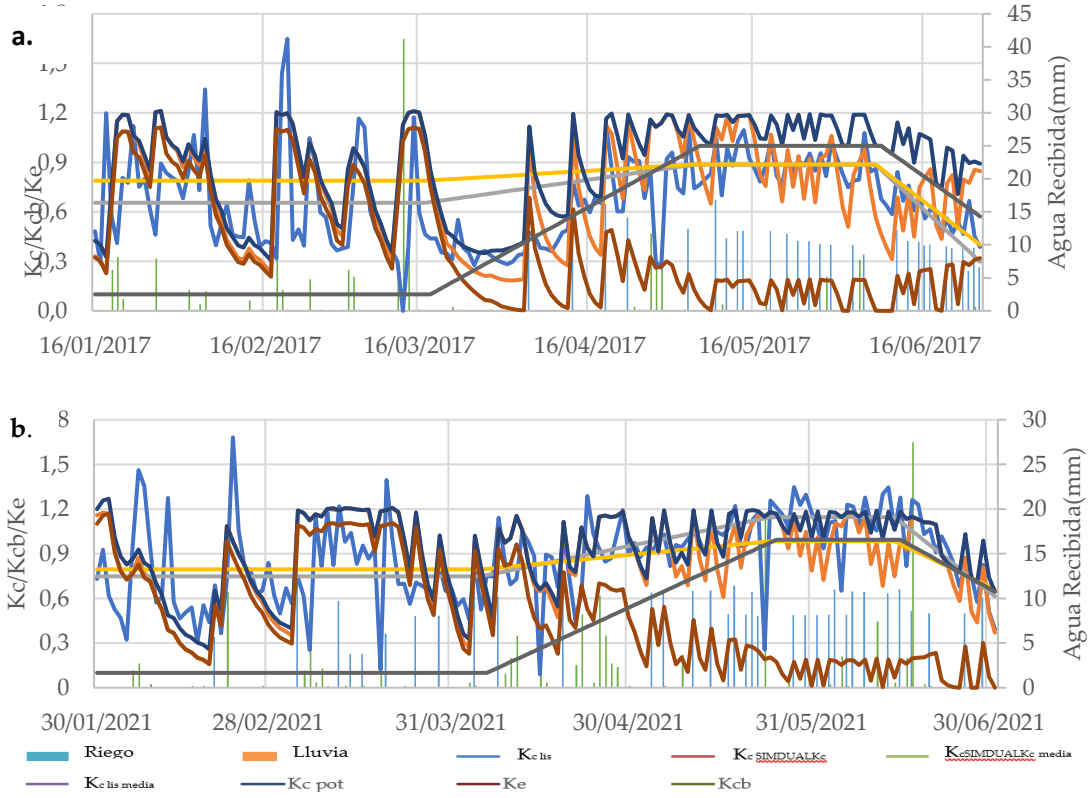
3.4. Coeficiente de cultivo observado y simulado

La Fig. 1 muestra la evolución estacional tanto del K_c único ($K_{c\ Lis\ media}$), derivado de las observaciones diarias del lisímetro ($K_{c\ lis}$), y la K_c obtenida por el modelo SIMDualKc ($K_{c\ SIMDUALKc\ media}$) la cual fue calculada a partir de los valores diarios ($K_{c\ SIMDUALKc}$) derivados de los valores de K_{cb} y K_e para los dos años de estudio (calibración y validación). También se muestra el valor de $K_{c\ pot}$ como el valor de K_c calculado por el modelo si el cultivo se desarrolla bajo condiciones de no déficit hídrico o salino.

En 2017 (calibración) (Fig. 1a.), durante la etapa inicial de crecimiento, el K_c promedio observado ($K_{c\ Lis\ media}$, Fig. 1a) tuvo un valor de 0.7, ligeramente inferior al valor obtenido por el modelo SIMDualKc (0.8). Lo mismo ocurrió durante la etapa de mitad de temporada, donde el valor medio del modelo fue idéntico al observado (0.9). El valor medio de K_c fue menor que el valor de K_{cb} utilizado en la calibración debido a que el cultivo sufrió estrés hídrico durante ciertas etapas fenológicas según la estimación del modelo (K_c SIMDualKc < $K_{c\ pot}$). Los valores finales de K_c calculados por el modelo (0.4) fueron muy similares a los valores observados (0.3).

Para la validación (2021) (Fig. 1b), el valor medio de K_c observado durante la etapa inicial (0.75) fue ligeramente inferior al obtenido por el modelo (0.79), lo que indica una ligera sobreestimación en esta etapa y confirma lo observado durante la calibración. Sin embargo, durante la etapa de mitad de temporada, el modelo (0.98) pareció subestimar ligeramente el valor observado (1.15) simulando también un ligero déficit hídrico en esta etapa. En la última etapa, el valor observado (0.61) fue ligeramente inferior al simulado (0.66). Estas diferencias pueden explicarse examinando los valores diarios de los dos años (línea azul claro, Fig. 1), donde se pueden observar numerosos picos debido a eventos de lluvia y riego. Estas fluctuaciones se atribuyen a fenómenos de evaporación, como lo demuestran las grandes variaciones en K_e (línea granate, Figura 1). El K_e representó el 91% y el 92% del K_c único durante la etapa inicial, cuando el cultivo apenas cubría el suelo y hubo varios eventos de humedecimiento de la superficie del suelo. Por el contrario, el K_e alcanzó sus valores más bajos (13% de K_c único) durante la etapa de mitad de temporada, cuando la cobertura del suelo estuvo en su máximo (0.85), seguido de un ligero aumento al final del ciclo debido a la reducción del grado de cobertura del suelo. Las diferencias en K_e entre años pueden atribuirse a las variaciones en f_c, así como a la magnitud y frecuencia de los eventos de riego y lluvia, correspondiendo los valores más altos de K_e a una mayor magnitud y frecuencia de estos eventos.

Figura 1: Evolución de los coeficientes K_{cb}; K_e y K_c para las siguientes condiciones experimentales a. 2017, b. 2021.



5. Conclusiones

La calibración y validación del modelo SIMDualKc demostraron que es capaz de estimar con precisión las dinámicas diarias de la $ET_{c\ act}$ en ajo bajo diferentes condiciones de riego y clima. Los ajustes del modelo, en particular para $K_{c\ end}$ y REW, mejoraron significativamente su precisión al reducir los valores de RMSE y NRMSE. El menor valor de $K_{c\ end}$ observado se atribuyó al contenido de humedad del bulbo en la cosecha, lo que resalta la importancia de este factor en la estimación del uso de agua del cultivo.

El proceso de validación confirmó la robustez del modelo, como lo reflejan los altos valores de eficiencia (EF = 0.96-0.98) y la fuerte concordancia entre los datos observados y simulados. No obstante, se identificaron algunas discrepancias, especialmente durante las etapas intermedia y final del ciclo, donde se produjeron ligeras sobrestimaciones y subestimaciones. Estas diferencias se debieron principalmente a la variabilidad en la cobertura del suelo por el cultivo durante dichas fases de crecimiento, lo que influyó en los valores de K_c. En contraste, durante las primeras etapas, las fluctuaciones en K_c fueron impulsadas en gran medida por eventos de lluvia y riego, que afectaron significativamente los valores de K_e por la misma razón.

En general, el modelo demostró ser una herramienta adecuada para la simulación de la dinámica de la evapotranspiración del ajo, con errores dentro de rangos aceptables. La fuerte relación lineal entre los valores observados y simulados (coeficientes b_o entre 0.91 y 1.03) respalda aún más su aplicabilidad. Estos hallazgos sugieren que el modelo puede utilizarse eficazmente para la planificación del riego y la gestión del agua en el cultivo de ajo, especialmente cuando se consideran adecuadamente las condiciones locales, como el contenido de humedad del bulbo en la cosecha y la variabilidad en la fracción de cubierta vegetal.

Contribuciones de los Autores: Conceptualización: Paredes P., Martínez-López J.A.; metodología: Paredes P.; software: Paredes P.; validación: Martínez-López J.A., Pardo J.J., Martínez-López H.; análisis formal: Martínez-López J.A., Paredes P. ; investigación: Martínez-López J.A., Pardo J.J., Martínez-López H. y Montoya F.; recursos: Pardo J.J., Martínez-López H., Montoya F. ; curación de datos: Martínez-López J.A., Pardo J.J.; redacción—preparación del borrador original: Martínez-López J.A.; redacción—revisión y edición: Todos los autores; supervisión: Paredes P., Domínguez A. y López-Urrea R.; administración del proyecto: Domínguez A.; adquisición de financiación: Domínguez A. y Martínez-López J.A. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades del Gobierno de España que financia el contrato predoctoral FPU21/02676 del investigador J.A. Martínez-López, a través del programa de ayudas complementarias de movilidad destinadas a beneficiarios del programa de formación del profesorado universitario (FPU) 2024 (EST24/00173).

Declaración del Comité de Ética Institucional: No aplica.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplica.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias

1. Léllis, B.C.; Martínez-Romero, A.; Schwartz, R.C.; Pardo, J.J.; Tarjuelo, J.M.; Domínguez, A. Effect of the Optimized Regulated Deficit Irrigation Methodology on Water Use in Garlic. *Agric Water Manag* **2022**, *260*, doi:10.1016/j.agwat.2021.107280.
2. Calvin, K.; Dasgupta, D.; Krinner, G.; Mukherji, A.; Thorne, P.W.; Trisos, C.; Romero, J.; Aldunce, P.; Barrett, K.; Blanco, G.; et al. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J.J., Pichs-Madruga, R., Rose, S.K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürge-Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Romero, J., Kim, J., Haites, E.F., Jung, Y., Stavins, R., Birt, A., Ha, M., Orendain, D.J.A., Ignon, L., Park, S., Park, Y., Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestvedt, J.S., Hansen, G., Ludden, C., Masson-Delmotte, V., Matthews, J.B.R., Mintenbeck, K., Pirani, A., Poloczanska, E., Leprince-Ringuet, N., Péan, C., Eds.; Geneva, Switzerland, 2023;
3. H.-O. Pörtner; D.C. Roberts; M. Tignor; E.S. Poloczanska; K. Mintenbeck; A. Alegría; M. Craig; S. Langsdorf; S. Löschke; V. Möller; et al. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2023; ISBN 9781009325844.
4. Malhi, G.S.; Kaur, M.; Kaushik, P. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability (Switzerland)* 2021, *13*, 1–21.
5. Domínguez, A.; Martínez-Romero, A.; Leite, K.N.; Tarjuelo, J.M.; de Juan, J.A.; López-Urrea, R. Combination of Typical Meteorological Year with Regulated Deficit Irrigation to Improve the Profitability of Garlic Growing in Central Spain. *Agric Water Manag* **2013**, *130*, 154–167, doi:10.1016/j.agwat.2013.08.024.
6. Fabeiro, C.; Martín De Santa Olalla F.; López - Urrea, R. *Agricultural Water Management*. 2003, pp. 155–167.
7. Martínez-López, J.A.; López-Urrea, R.; Martínez-Romero, Á.; Pardo, J.J.; Montoya, F.; Domínguez, A. Improving the Sustainability and Profitability of Oat and Garlic Crops in a Mediterranean Agro-Ecosystem under Water-Scarce Conditions. *Agronomy* **2022**, *12*, doi:10.3390/agronomy12081950.
8. FAOSTAT Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Available online: https://www.fao.org/faostat/en/#data. (accessed on 7 February 2022).
9. MAPA *Encuesta Sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos(ESYRCE). Análisis de Los Regadíos En España.*; 2021;
10. Ortega Álvarez, J.F.; De Juan Valero, J.A.; Tarjuelo Martín-Benito, J.M.; López Mata, E. MOPECO: An Economic Optimization Model for Irrigation Water Management. *Irrig Sci* **2004**, *23*, 61–75, doi:10.1007/s00271-004-0094-x.
11. Pereira, L.S.; Teodoro, P.R.; Rodrigues, P.N.; Teixeira, J.L. Irrigation Scheduling Simulation: The Model Isareg. In; 2003; pp. 161–180.
12. Vanuytrecht, E.; Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Heng, L.K.; Garcia Vila, M.; Mejias Moreno, P. AquaCrop: FAO's Crop Water Productivity and Yield Response Model. *Environmental Modelling and Software* **2014**, *62*, 351–360, doi:10.1016/j.envsoft.2014.08.005.
13. Rosa, R.D.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Alves, I.; Fernando, R.M.; Pereira, L.S.; Allen, R.G. Implementing the Dual Crop Coefficient Approach in Interactive Software. 1. Background and Computational Strategy. *Agric Water Manag* **2012**, *103*, 8–24, doi:10.1016/j.agwat.2011.10.013.
14. Martín de Santa Olalla, F.; Dominguez, A.; Ortega, F.; Artigao, A.; Fabeiro, C. Bayesian Networks in Planning a Large Aquifer in Eastern Mancha, Spain. *Environmental Modelling and Software* **2007**, *22*, 1089–1100, doi:10.1016/j.envsoft.2006.05.020.
15. Martínez-López, J.A.; López-Urrea, R.; Martínez-Romero, Á.; Pardo, J.J.; Montero, J.; Domínguez, A. Sustainable Production of Barley in a Water-Scarce Mediterranean Agroecosystem. *Agronomy* **2022**, *12*, 1358, doi:10.3390/agronomy12061358.
16. Liu, M.; Paredes, P.; Shi, H.; Ramos, T.B.; Dou, X.; Dai, L.; Pereira, L.S. Impacts of a Shallow Saline Water Table on Maize Evapotranspiration and Groundwater Contribution Using Static Water Table Lysimeters and the Dual Kc Water Balance Model SIMDualKc. *Agric Water Manag* **2022**, *273*, doi:10.1016/j.agwat.2022.107887.

17. Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Alves, I.; Pereira, L.S. Partitioning Evapotranspiration, Yield Prediction and Economic Returns of Maize under Various Irrigation Management Strategies. *Agric Water Manag* **2014**, *135*, 27–39, doi:10.1016/j.agwat.2013.12.010.
18. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J.L. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **2005**, *131*, 2–13, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2).
19. Paredes, P.; Pereira, L.S.; Rodrigues, G.C.; Botelho, N.; Torres, M.O. Using the FAO Dual Crop Coefficient Approach to Model Water Use and Productivity of Processing Pea (Pisum Sativum L.) as Influenced by Irrigation Strategies. *Agric Water Manag* **2017**, *189*, 5–18, doi:10.1016/j.agwat.2017.04.010.
20. Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Cameira, M. do R.; Torres, M.O.; Pereira, L.S. Assessing Yield, Water Productivity and Farm Economic Returns of Malt Barley as Influenced by the Sowing Dates and Supplemental Irrigation. *Agric Water Manag* **2017**, *179*, 132–143, doi:10.1016/j.agwat.2016.05.033.
21. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56*; 1998;
22. Pardo, J.J.; Martínez-Romero, A.; Léllis, B.C.; Tarjuelo, J.M.; Domínguez, A. Effect of the Optimized Regulated Deficit Irrigation Methodology on Water Use in Barley under Semiarid Conditions. *Agric Water Manag* **2020**, *228*, doi:10.1016/j.agwat.2019.105925.
23. MAPAMA Red de Estaciones Agrometeorológicas Del Servicio de Información Agroclimática Para El Regadío (SiAR) Del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPAMA, 2024).
24. López-Urrea, R.; Pardo, J.J.; Simón, L.; Martínez-Romero, Á.; Montoya, F.; Tarjuelo, J.M.; Domínguez, A. Assessing a Removable Mini-Lysimeter for Monitoring Crop Evapotranspiration Using a Well-Established Large Weighing Lysimeter: A Case Study for Barley and Potato. *Agronomy* **2021**, *11*, doi:10.3390/agronomy11102067.
25. Bleiholder, H.; Weber, E.; Lancashire, P.D.; Feller, C.; Buhr, L.; Hess, M.; Wicke, H.; Hack, H.; Meier, U.; Klose, R.; et al. *Growth Stages of Mono-and Dicotyledonous Plants BBCH Monograph*; Meier, U., Ed.; 2 nd.; Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry: Braunschweig, Germany, 2001;
26. Liu, Y.; Pereira, L.S.; Fernando, R.M. Fluxes through the Bottom Boundary of the Root Zone in Silty Soils: Parametric Approaches to Estimate Groundwater Contribution and Percolation. *Agric Water Manag* **2006**, *84*, 27–40, doi:10.1016/j.agwat.2006.01.018.
27. Liu, M.; Shi, H.; Paredes, P.; Ramos, T.B.; Dai, L.; Feng, Z.; Pereira, L.S. Estimating and Partitioning Maize Evapotranspiration as Affected by Salinity Using Weighing Lysimeters and the SIMDualKc Model. *Agric Water Manag* **2022**, *261*, doi:10.1016/j.agwat.2021.107362.
28. Petry, M.T.; Tonetto, F.; Martins, J.D.; Slim, J.E.; Werle, R.; Gonçalves, A.F.; Paredes, P.; Pereira, L.S. Evapotranspiration and Crop Coefficients of Sprinkler-Irrigated Aerobic Rice in Southern Brazil Using the SIMDualKc Water Balance Model. *Irrig Sci* **2024**, doi:10.1007/s00271-024-00917-7.
29. Giménez, L.; Petillo, M.G.; Paredes, P.; Pereira, L.S. Predicting Maize Transpiration,Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. *Water (Switzerland)* **2016**, *8*, doi:10.3390/w8070309.
30. Pereira, L.S.; Paredes, P.; López-Urrea, R.; Hunsaker, D.J.; Mota, M.; Mohammadi Shad, Z. Standard Single and Basal Crop Coefficients for Vegetable Crops, an Update of FAO56 Crop Water Requirements Approach. *Agric Water Manag* 2021, *243*.
31. Nash, J.E.; Sutcliffe, J. V *RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART I-A DISCUSSION OF PRINCIPLES**; © North-Holland Publishing Co, 1970; Vol. 10;.
32. Jacovides, C.P.; Kontoyiannis, H. *Agricultural Water Management Statistical Procedures for the Evaluation of Evapotranspiration Computing Models*; 1995; Vol. 27;.
33. Montoya Sevilla, F. *CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DE PATATA (Solanum Tuberosum L.) BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS DE RIEGO CON PÍVOT EN CONDICIONES SEMIÁRIDAS*; Albacete., 2013;
34. Chaterlan, Y.; León, M.; Duarte, C.; López, T.; Habana, L.; Paredes, C.P.; Pereira, L.S. *Determination of Crop Coefficients for Horticultural Crops in Cuba through Field Experiments and Water Balance Simulation*; 2011;
35. Villalobos, F.J.; Testi, L.; Rizzalli, R.; Orgaz, F. Evapotranspiration and Crop Coefficients of Irrigated Garlic (Allium Sativum L.) in a Semi-Arid Climate. *Agric Water Manag* **2004**, *64*, 233–249, doi:10.1016/S0378-3774(03)00198-7.

36. Bryla, D.R.; Trout, T.J.; Ayars, J.E. *Weighing Lysimeters for Developing Crop Coefficients and Efficient Irrigation Practices for Vegetable Crops*; 2010;
37. Johnson, L.F.; Trout, T.J. Satellite NDVI Assisted Monitoring of Vegetable Crop Evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sens (Basel)* **2012**, *4*, 439–455, doi:10.3390/rs4020439.

From research to practice: Simplifying and implementing the MOPECO model for efficient irrigation in annual crops

Alfonso Domínguez[1]*; José Antonio Martínez-López[1]; Higinio Martínez-López[1]; José Jesús Pardo[1]; Ángel Martínez-Romero[1]

[1] Universidad de Castilla-La Mancha; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA); Carretera de Las Peñas km 3,2; 02071 Albacete (Spain)

* Correspondence: alfonso.dominguez@uclm.es; Tel.: +34 926 05 28 87

Abstract: Despite the large number of research models developed, only a few have been successfully transferred to the productive sector. The SUPROMED project, funded by PRIMA, sought to develop an online platform integrating several models adapted to the requirements of end users to increase the economic and environmental sustainability of Mediterranean agricultural systems. MOPECO was designed to maximize the profitability of irrigated farms. A simplified version of this model (MOPECO irrigation scheduling) was included in the SUPROMED platform to improve irrigation efficiency. This paper shows the approach to adapt and transfer MOPECO to the productive sector. The tool was validated in three distinct demo-site areas across the Mediterranean (Eastern Mancha in Spain, Bekaa valley in Lebanon, and Sidi Bouzid in Tunisia), involving local stakeholders in the design, validation, and dissemination of the software. The simplified tool reached similar or higher yields (around 10%) than farmers, using less water (around 16%). This fact decreased the water footprint and increased the profitability of farms. The high applicability of the tool has generated interest among many technicians, farmers, and advisory enterprises. Thus, the government of Castilla-La Mancha is promoting its use among farmers and technicians in this region through the RETOAGUA programme.

Keywords: Stakeholders; Sustainability; Climate change; Water scarcity; Modelling; Transference

1. Introduction

Most models developed by research projects are rarely utilized by the productive sector. The main causes of this situation are the difficulties non-scientific or non-expert users experience in managing typically complex models, the lack of adaptation of the model to the real needs of the end users, and the impossibility of their obtaining some of the data required by the model [1].

From 2019 to 2022, the PRIMA programme (Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area) [2] funded the SUPROMED project (sustainable production in water-limited environments of Mediterranean agroecosystems), which aimed to improve the economic and environmental sustainability of Mediterranean farming systems. Thus, 10 models and methodologies adapted to end users and validated in three demo sites areas were transferred to the productive sector through an online platform available on the project website (www.supromed.eu). The models and tools were developed by some of the ten partners participating in the project, who come from five different nations (Spain, France, Greece, Lebanon, and Tunisia).

MOPECO (model for the economic optimization of irrigation water use at farm level) [3,4] was one of the selected models. By making optimal use of the available irrigation water and cultivable area [5,6] MOPECO maximizes profitability for irrigated farms in water-scarce arid and semi-arid regions. Among other options, MOPECO generates irrigation schedules that account for the total available irrigation water on the farm, requiring a high number of variables and crop parameters for running. that would make their widespread use by the productive sector impossible.

The main aim of this work is to show how research models can be used by the productive sector after their proper adaptation and transference to the end-users.

2. Materials and Methods

The methodologies and models included in SUPROMED project were tested in three demo-sites across the Mediterranean area (Eastern Mancha in Spain, Bekaa valley in Lebanon, and Sidi Bouzid in Tunisia) (Figure 1).

Figure 1. Location of the 3 demo-site areas.

MOPECO [3] (model for the economical optimization of irrigation water) has been calibrated for the principal crops cultivated in the Eastern Mancha aquifer region (Figure 1) (maize, barley, onion, melon and garlic) using data from full and deficit irrigation field studies [6-9]. The aim of MOPECO is to maximize gross margin (GM) through efficient use of irrigation water and available irrigable land. A set of data (Figure 2a) is required for the simulation of the optimal "Yield vs. Total Net Water" function of each crop under the climatic conditions of a certain year which is translated into "Yield vs. Total Gross Water" function by using economic data on the crop. Finally, the model calculates the optimal crop distribution that fulfil the restrictions imposed by the user (Figure 2a). However, for the simplified model version , only the data required for determining full-irrigation scheduling parameters are utilized (Figure 2b) [10].

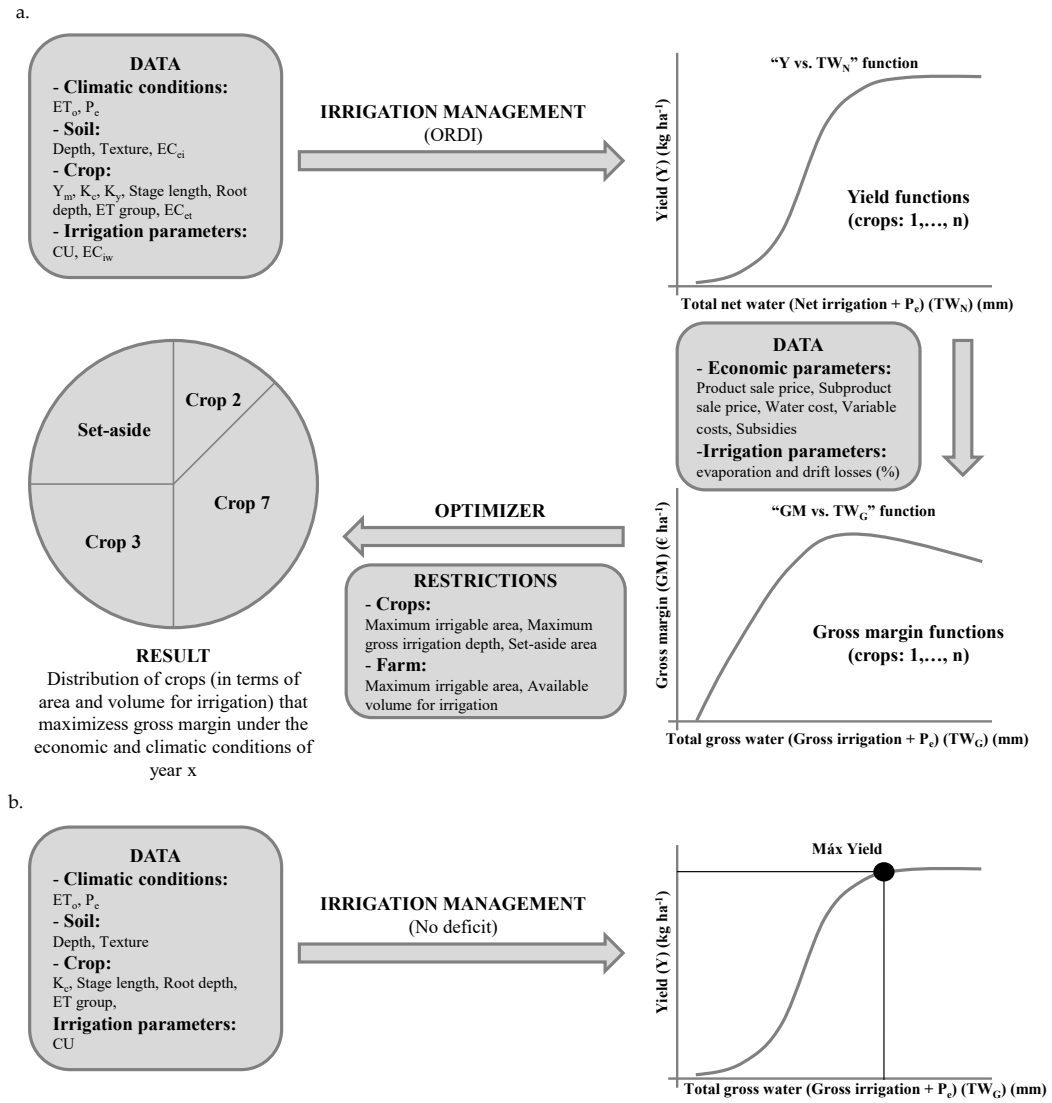


Figure 2. Flow chart of MOPECO model for a) researchers, and b) simplified for farmers and technicians.

Following the methodology developed by [11], the aspects to consider when developing a model for the productive sector are:

a. Identifying the problems and the owners of these problems.

b. Considering how, and by how much, the proposed model solves the problems of end users compared to other alternatives.

c. Defining the use of the model and its customers.

d. Identifying the Key Exploitation Result (KER).

e. The terminology used in the model and the information required to run it must be understood and easily available for end-users.

f. Validating the model outside the partnership.

g. To transfer the model to end users.

h. Organizing the team for implementation.

i. Defining the follow up activities for the period after the end of the project.

The previous information was reached through interviews, questionnaires and involving end-users in the development and validation of the tool in the 3 areas.

After the adaptation of the model, and its dissemination during the project, the government of Castilla-La Mancha (JCCM) proposed an agreement with our research team to promote the use of the tool in the region. Thus, the 3-year agreement included the improvement of the tool and to carry out several training courses for farmers and technicians.

3. Results

The simplified version of the MOPECO model for users in Castilla-La Mancha region was called “RETOAGUA”, which also includes a fertilization module developed by the Instituto Técnico Provincial de Albacete (ITAP), as they are also participating in the agreement with the JCCM. The tool is available at https://retoagua.uclm.es/ and on app store (smartphone version).

According to questionnaires results and personal interviews, end-users in all three areas demand a tool able to reach a suitable irrigation scheduling without requiring sensor investments or paying a great amount for this service. This response invalidates many of the actual ways to determine a suitable irrigation scheduling.

Thus, the most suitable option was to develop a free software that requires a low number of variables. For the irrigation scheduling calculation, the simplified MOPECO tool decreased up to 10 the number of data the user must insert in the tool (4 more for advanced users) with regards 43 for the case of MOPECO for researchers (Domínguez et al., 2023). The main result of the tool is to determine the irrigation requirements of the crops for the next week, taking into account the seeding date, the soil properties of the plot, the irrigation system characteristics, the climatic conditions and the amount of water supplied by the farmer to the crop. An example for a barley crop cultivated in Albacete is shown in Figures 3a-f.

Figure 3a. Welcome screen.

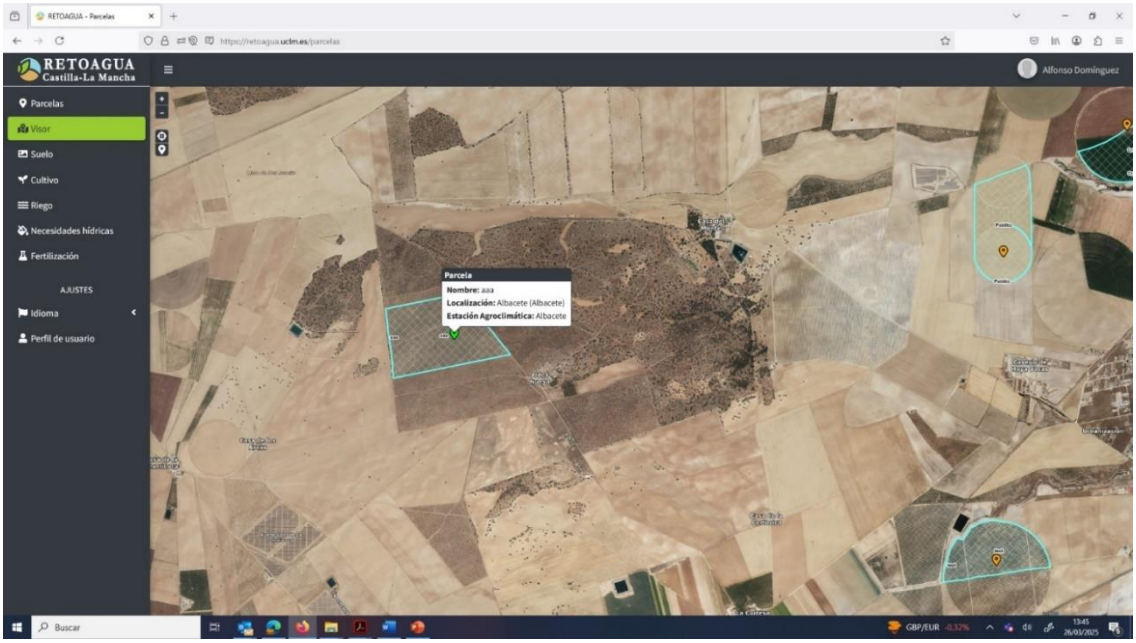


Figure 3b. Location of the plot and selection of weather station.

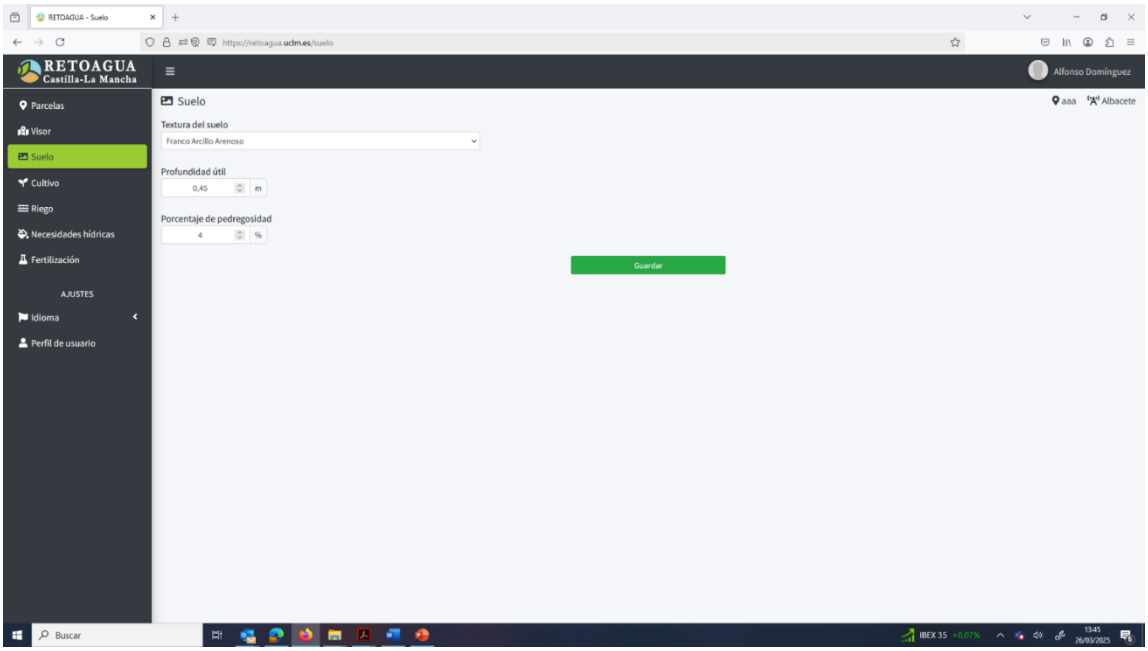


Figure 3c. Soil properties of the selected plot.

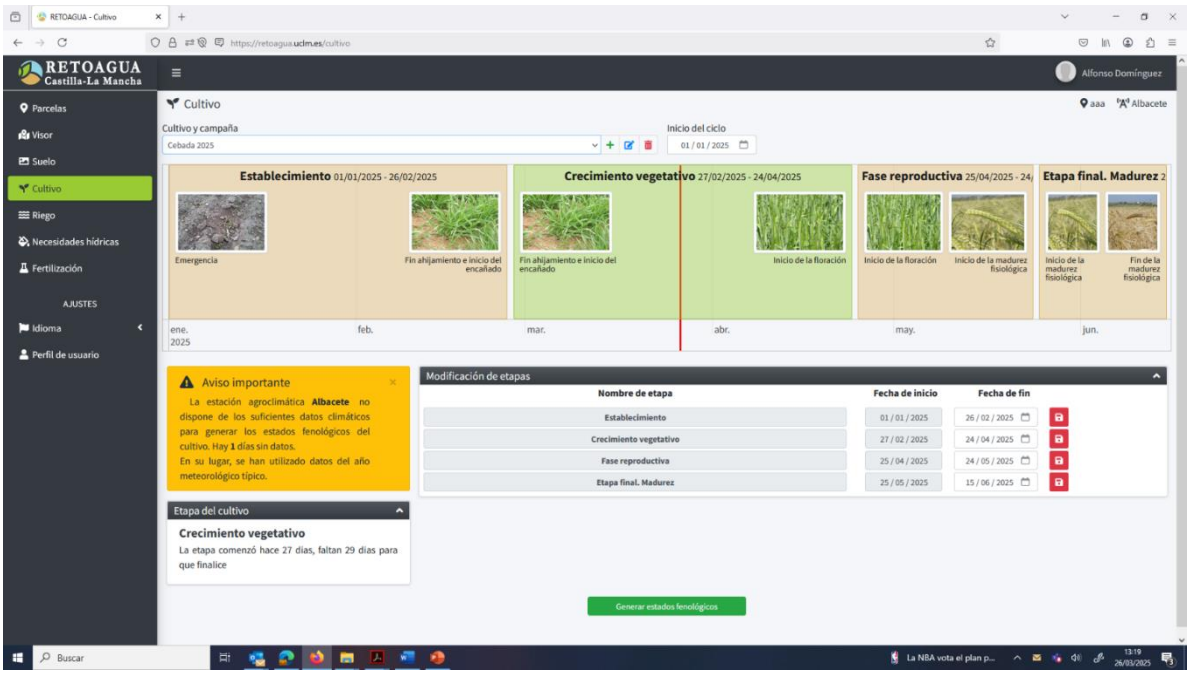


Figure 3d. Crop data and theoretical phenological progression.

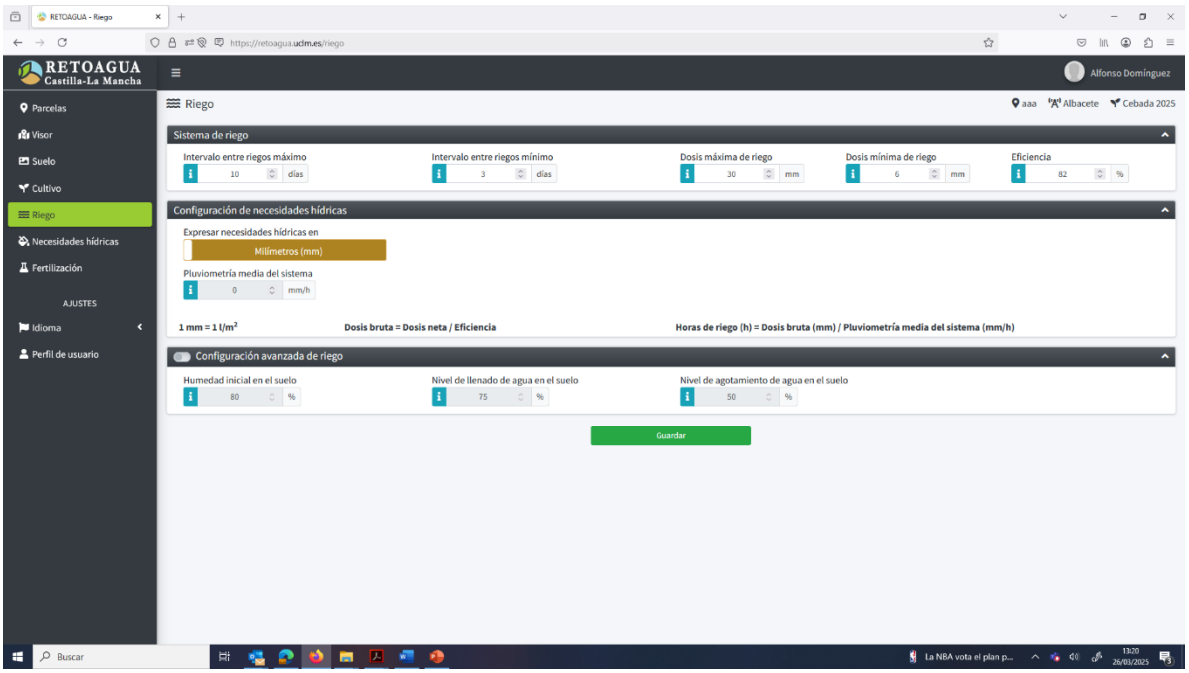


Figure 3e. Irrigation system management.

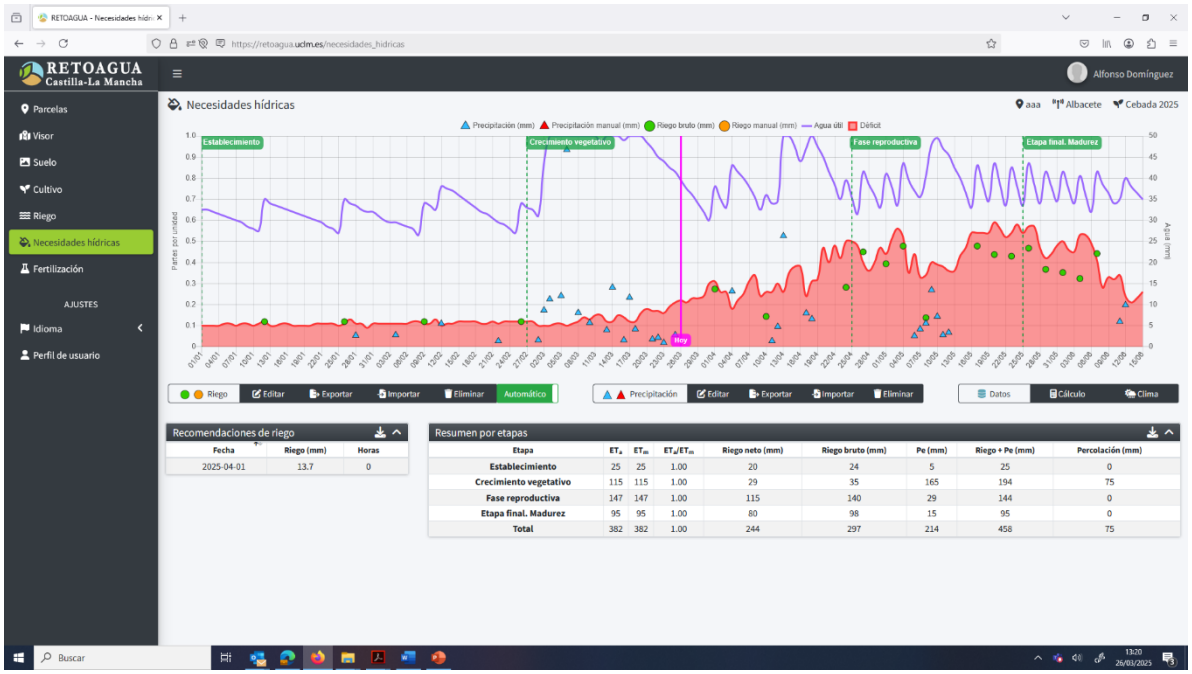


Figure 3f. Soil water balance and irrigation scheduling for a barley crop.

In total, from 2021 to beginning of 2025, 3 congresses, 2 workshops and 9 training courses were carried out for promoting the use of the tool, once it was operative:

- Albacete (September, 2022): International congress
- Dakhla, Morocco (January, 2023): International congress
- Online (February, 2023): Workshop
- Internal course (March, 2023): Training course
- Vienna (April, 2023): International congress
- Tomelloso (October, 2023): Training course
- Daimiel (February, 2024): Training course
- Villacañas (March, 2024): Training course
- Tomelloso (April, 2024): Training course
- Expovicaman-Albacete (May 9-12th 2024): Workshop
- La Solana (May, 2024): Training course
- Malagón (June, 2024): Training course
- Albacete (October, 2024): Training course
- Guadalajara (February, 2025): Training course

The current number of users of RETOAGUA tool is 528 (March 2025), and as it can be stated in Figure 4, the number of users increased significantly in those months

when a promotion activity was carried out. In the same way, the trend of the function increased when training courses started.

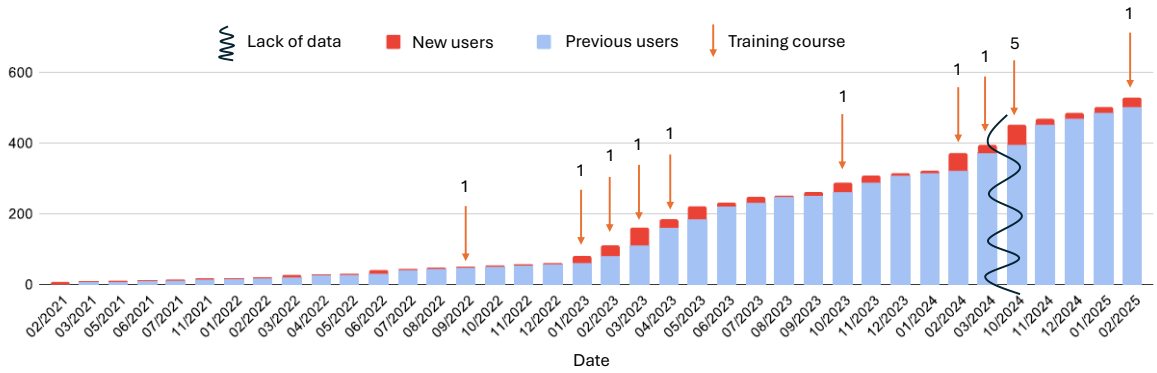


Figure 4. Progression of total registered users.

4. Discussion

Despite the great effort carried out to adapt the model to the requirements of end-users and the high number of dissemination activities carried out during the last 2 years, more training and dissemination courses are necessary to reach a real implementation of RETOAGUA in the region. Thus, the higher increase in the number of users tends to coincide with a dissemination activity. Nevertheless, we have noticed a certain reluctance among users to use the tool, because some of them are afraid that the tool could be used to control the amount of water they are supplying to the crops, being this a sensible data in the area.

At the time of writing this communication we are at the beginning of the irrigation season (March 2025) and the great number of rainfall events that have occurred during the last months have avoided the necessity to irrigate. Consequently, nowadays it is not possible to know the number of irrigators who will use the tool during the following months.

The server provides the number of daily users of the tool, being in this moment (March 2025) very low (less than 10 per day). Nevertheless, we expect this number to increase in the following weeks, showing the updated data during the presentation of this communication.

5. Conclusions

The irrigation sector requires tools to achieve efficient use of water resources, which must be adapted to the needs of the end-users and validated in their intended areas of use.

Nevertheless, an intensive program of activities focused on disseminating and training in the use of the tools is required in order to demonstrate their applicability and the advantages they can offer to the users.

Author Contributions: Conceptualization: Alfonso Domínguez; Methodology: Alfonso Domínguez and Ángel Martínez-Romero; Validation: José Jesús Pardo, José Antonio Martínez-López and Higinio Martínez-López; Writing: all; Funding acquisition: Alfonso Domínguez. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Funding: This work was funded by the Spanish Research Agency (Agencia Estatal de Investigación), the Regional Government of Castilla-La Mancha, FEDER and PRIMA programmes, in the framework of ORDILS "PID 2020-120347RB-100", SUPROMED "GA 1813", and RETOAGUA projects.

Institutional Review Board Statement: No applicable.

Informed Consent Statement: No applicable.

Data Availability Statement: Data are available under request.

References

1. Lynne, M. If We Build It, They Will Come: Designing Information Systems That People Want to Use. *MIT Sloan Manag. Rev*. **1994**, 35, 11.
2. PRIMA: Partnership for Research & Innovation in the Mediterranean Area. Available online: https://prima-med.org/ (accessed on 31 October 2022).
3. Ortega Álvarez, J.F.; de Juan Valero, J.A.; Tarjuelo Martín-Benito, J.M.; López Mata, E. MOPECO: An Economic Optimization Model for Irrigation Water Management. *Irrig. Sci.* **2004**, 23, 61–75.
4. De Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; Valiente, M.; García, P. Model for Optimal Cropping Patterns within the Farm Based on Crop Water Production Functions and Irrigation Uniformity. I: Development of a Decision Model. *Agric. Water Manag*. **1996**, 31, 115–143.
5. López-Mata, E.; Tarjuelo, J.M.; de Juan, J.A.; Ballesteros, R.; Domínguez, A. Effect of Irrigation Uniformity on the Profitability of Crops. *Agric. Water Manag*. **2010**, 98, 190–198.
6. Domínguez, A.; Martínez, R.S.; De Juan, J.A.; Martínez-Romero, A.; Tarjuelo, J.M. Simulation of Maize Crop Behavior under Deficit Irrigation Using MOPECO Model in a Semi-Arid Environment. *Agric. Water Manag*. **2012**, 107, 42–53.
7. Domínguez, A.; Jiménez, M.; Tarjuelo, J.M.; de Juan, J.A.; Martínez-Romero, A.; Leite, K.N. Simulation of Onion Crop Behavior under Optimized Regulated Deficit Irrigation Using MOPECO Model in a Semi-Arid Environment. *Agric. Water Manag*. **2012**, 113, 64–75.
8. Domínguez, A.; Martínez-Romero, A.; Leite, K.N.; Tarjuelo, J.M.; de Juan, J.A.; López-Urrea, R. Combination of Typical Meteorological Year with Regulated Deficit Irrigation to Improve the Profitability of Garlic Growing in Central Spain. *Agric. Water Manag*. **2013**, 130, 154–167.
9. Leite, K.N.; Cabello, M.J.; Valnir Júnior, M.; Tarjuelo, J.M.; Domínguez, A. Modelling Sustainable Salt Water Management under Deficit Irrigation Conditions for Melon in Spain and Brazil. *J. Sci. Food Agric.* **2015**, 95, 2307–2318.
10. Domínguez, A.; Martínez-López J.A.; Amami, H.; Nsiri, R.; Karam, F.; Oueslati, M. Adaptation of a Scientific Decision Support System to the Productive Sector—A Case Study: MOPECO Irrigation Scheduling Model for Annual Crops. *Water* **2023,** 15, 1691.
11. Melasecche Germini, A.; di Anselmo, A. Common Exploitation Booster Publishable Executive Summary; Publications Office of the EU: Luxembourg, **2018**.

Plataforma Arduíno para Monitoramento da Irrigação no Cultivo do Tomateiro

Daniel Fonseca de Carvalho[1,*], Michel Douglas Santos Ribeiro[2], Leonardo Oliveira Medici[3] and Marinaldo Ferreira Pinto[2]

Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ); carvalho@ufrrj.br (D.F.C.); mfpufrrj@yahoo.com.br (M.F.P.)

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, UFRRJ; mycheldouglass@gmail.com

Departamento de Ciências Fisiológicas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; lmedici@gmail.com

* Autor de correspondência: carvalho@ufrrj.br; +55 21 98787-7262 (D.F.C.)

Resumo: Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de controle e monitoramento da irrigação utilizando Arduino Mega, que foi avaliado no cultivo do tomateiro. O trabalho foi realizado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O sistema de controle e monitoramento foi programado para receber sinal emitido por um acionador automático de irrigação (AAI), que opera em resposta à tensão de água no solo. O tomateiro híbrido "Dominador F1" foi cultivado em solo (T1) e no sistema Verdeponia, com aparas de grama e gliricidia (T2). As plantas foram irrigadas com emissores de vazão nominal de 2,0 L h^{-1}. O cultivo foi realizado em área experimental, no período de maio a outubro de 2023. A produção de frutos foi contabilizada ao longo de 10 colheitas, totalizando 21 semanas de ciclo. Nesse período houve 137 acionamentos, com tempo médio diário de irrigação de 13,30 min, possibilitando a aplicação de 58,48 L por planta. As plantas produziram, em média, 4,18 kg (T1) e 5,95 kg (T2) de tomate, equivalente a produtividades de 83,56 e 119,06 kg ha^{-1}. A plataforma desenvolvida acoplada ao AAI apresentou desempenho satisfatório no monitoramento das irrigações, possibilitando o controle e a quantificação da necessidade hídrica do tomateiro.

Palavras-chave: manejo da irrigação; acionamento automático; *Solanum lycopersicum* L.

1. Introdução

No sistema de produção agrícola, a água é um dos recursos mais críticos e para manter altos rendimentos das culturas é necessário o atendimento das suas necessidades hídricas nas diferentes fases de desenvolvimento [1]. A quantidade de

água necessária às culturas depende da espécie, da variedade e das condições edafoclimáticas [2], e se refere ao volume de água necessário para manter as taxas máximas de evapotranspiração da cultura (ETc), garantindo assim que a mesma não sofra estresse hídrico [3].

Os sistemas de irrigação devem ser manejados com eficiência para que não ocorra irrigação excessiva ou deficitária, que podem causar redução na produtividade e na qualidade das culturas, aumento dos custos de bombeamento e lixiviação de nutrientes solúveis da zona radicular [4]. O manejo da irrigação pode ser implementado por meio de sensores de umidade do solo, que permitem o fornecimento e/ou reposição de água ao solo na quantidade e momento oportunos [5-7].

Uma abordagem mais racional para otimizar o uso da água de irrigação é a associação de técnicas de automação aos sistemas de irrigação. Muitos pesquisadores relataram que automação em projetos de irrigação usando controladores inteligentes e uma rede de sensores podem economizar água em até 38% [8]. Utilizando o microcontrolador Arduino UNO, [4] apresentam um dispositivo acoplado a tensiômetros que permite ao agricultor conhecer o conteúdo de água do solo e programar a irrigação com relação às necessidades da cultura. Portanto, além do emprego da automação, o uso de plataformas que permitam o registro das informações relacionadas aos eventos de irrigação, como frequência de acionamento, tempo de funcionamento e volume aplicado, são importantes ferramentas no gerenciamento dos recursos hídricos em áreas irrigadas.

O tomate (Solanum *lycopersicum* L.), pertencente à família Solanaceae, é o vegetal mais consumido no mundo, juntamente com outras espécies como as batatas, as berinjelas, as petúnias, o tabaco e as pimentas [9]. É considerada uma espécie de alto custo de produção, com longa estação de crescimento e altas necessidades de água e nutrientes. Entretanto, a quantidade de nutrientes absorvido pela planta dependerá de fatores ambientais abióticos e bióticos, podendo variar com o tipo de solo, condições climáticas, tratos culturais e o sistema e o manejo da irrigação.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de controle e monitoramento da irrigação utilizando a plataforma de prototipagem Arduino, e promover sua avaliação em campo em um cultivo orgânico de tomate.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Setor de Horticultura da UFRRJ (Seropédica, RJ, Brasil) (latitude 22º 45’48” S; longitude 43º 41’ 19” W; altitude de 33,0 m). As mudas foram preparadas em bandejas plásticas com

128 células preenchidas com substrato comercial (Carolina Soil®), utilizando sementes comerciais de cravo 'Chabaud Gigante' de flores dobradas vermelhas (Isla®, Brasil).

O trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizada no munícipio de Seropédica, Estado do Rio de Janeiro, Brasil (22°46'29,55" S e 43°41'12,16" W).

O sistema de controle e monitoramento das irrigações, visando a coleta e o armazenamento de dados foi composto de uma placa Arduino Mega 2560 e componentes como relés, módulos de tensão, SD card, dentre outros (Figura 1). O Arduino foi programado para receber sinal emitido por um acionador automático de irrigação (AAI) [10], possibilitando a quantificação do volume de água aplicado e o tempo de acionamento.

Figura 1. Componentes do sistema de controle e monitoramento do sistema de irrigação. 1: Arduino mega; 2: Modulo relé; 3: Módulo de cartão SD; 4: transformador de 24 VCA; 5: pressostato; 6: Módulo regulador de tensão; 7: módulo RTC; 8: motobomba; 9: válvula solenoide.

O AAI utiliza o princípio do tensiômetro e se caracteriza como de fácil construção e instalação em campo. É composto por uma cápsula cerâmica, uma mangueira de polietileno e um pressostato ou sensor de nível (Figura 2). A cápsula cerâmica é o sensor de tensão de água no solo e deve ser instalada na profundidade que representa o sistema radicular da cultura. O pressostato deve estar posicionado abaixo da cápsula e é exatamente essa diferença de nível que define a tensão de acionamento do sistema de irrigação.

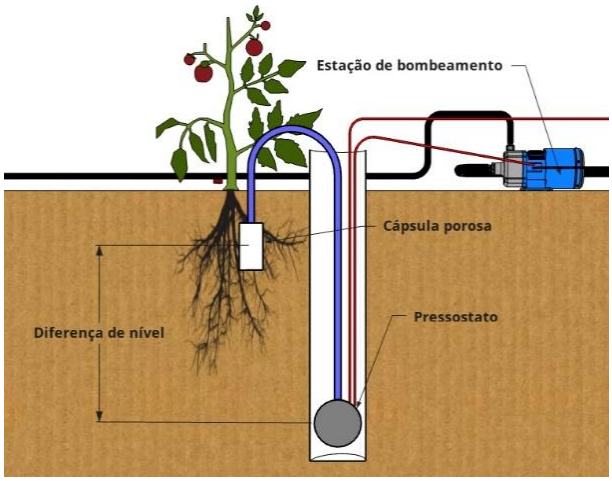


Figura 2. Esquema de instalação dos componentes do acionador automático para irrigação (AAI).

Em função da evapotranspiração do cultivo, o conteúdo de água no solo ou substrato irá diminuir provocando uma tensão na cápsula que é transmitida pelo tubo flexível até o pressostato. Quando essa tensão atingir o valor correspondente à coluna de água, equivalente à diferença de nível entre o sensor e o pressostato, o diafragma do pressostato aciona um comutador, fechando o contato do terminal comum com o terminal normalmente aberto. Como o terminal comum está conectado em 0 V (nível baixo), esse sinal é transmitido à porta digital do Arduino, conforme esquema elétrico apresentado na Figura 3.

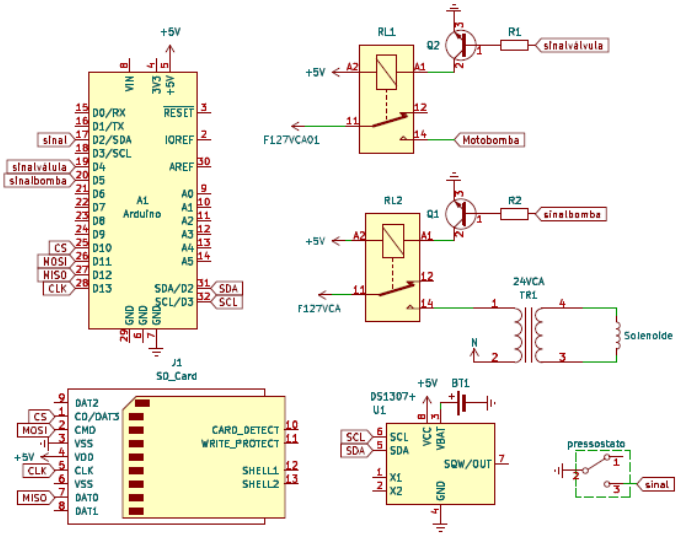


Figura 3. Esquema elétrico do sistema de controle e monitoramento da irrigação por meio do AAI.

Ao detectar o sinal elétrico, o Arduino emite os sinais elétricos de acionamento de dois relés, aos quais estão conectadas à motobomba e/ou válvula solenoide, fornecendo água ao sistema de irrigação. Após umedecimento do solo, a tensão na cápsula é aliviada, fazendo com que o sinal elétrico seja interrompido, indicando o

final da irrigação. Sendo assim, o sistema de controle abre os contatos dos relés, desligando a motobomba e/ou fechando a válvula solenoide. Portanto, o próprio potencial matricial da água no solo ou substrato irá comandar o sistema, evitando aplicações excessivas ou deficitárias.

A necessidade de dois relés se deveu ao fato de que a alimentação elétrica da motobomba é de 127 VCA e a válvula solenoide é de 24 VCA. Para obtenção da tensão de 24 VCA empregou-se um transformador com capacidade de 1 A. A lógica de controle de acionamento da válvula e da motobomba, bem como registro do momento da irrigação e sua duração está apresentada no fluxograma da Figura 4.

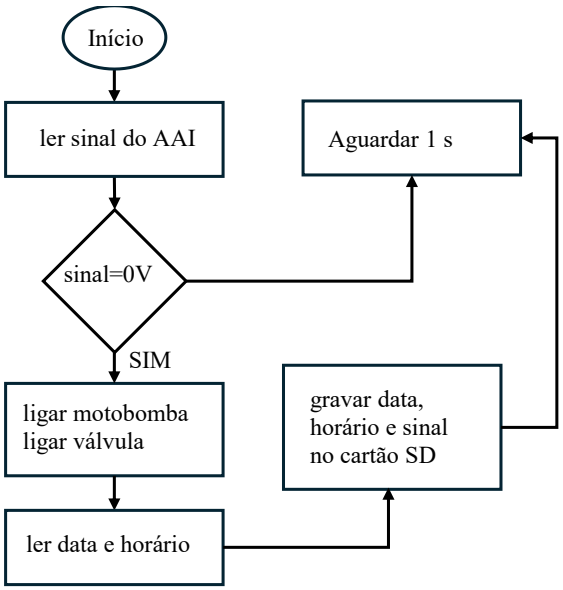


Figura 4. Fluxograma do algoritmo embarcado no sistema de controle e monitoramento da irrigação por meio do AAI.

A fim de avaliar o sistema de coleta e armazenamento de dados desenvolvido foi instalado um experimento de campo, no período de Maio a Setembro de 2023, em uma área experimental do campus da UFRRJ. O tomate (Solanum *lycopersicum* L.), híbrido Dominador F1 da Topseed, do grupo Caqui, foi cultivado diretamente no solo (T1) e também no sistema de Verdeponia (T2), que consiste na utilização de material verde não compostado como fonte principal ou parcial de nutrientes, proporcionando melhorias na qualidade química, biológica e física do solo e no desenvolvimento de plantas [11]. Neste ensaio foram utilizadas aparas de gramas (*Paspalum notatum*) e folhas de glirícidia (*Gliricidia septium*), na proporção de 50%, além do tratamento controle, utilizando solo + composto fermentado do tipo Bokashi. A área foi preparada para o plantio em sistema de covas (Figura 5), com dimensões de 0,25 m de diâmetro e 0,30 m de profundidade, simulando um vaso de, aproximadamente, 8,0 L.

As plantas foram irrigadas por gotejamento, cujo sistema era composto por linhas laterais constituídas por mangueiras de polietileno de 16 mm e emissores autocompensantes com vazão nominal de 2,0 L h^{-1} (PCJ-LCNL/Netafim). Após avaliação em campo, o sistema apresentou vazão média de 1,92 L h^{-1}, a uma pressão de 8,0 kPa, e uniformidade de distribuição de 92%. Para o manejo da irrigação, o AAI foi instalado na parcela correspondente ao tratamento controle, utilizando tensão de acionamento de 4 kPa.

As colheitas foram realizadas a partir dos 70 dias após o transplantio, no início do processo de amadurecimento, quando os frutos apresentavam coloração verde-rosado. Ao todo houve 10 colheitas, totalizando 21 semanas de ciclo. Foram considerados os dados médios coletados das quatro plantas úteis, sendo avaliados a produção total de frutos ao longo das colheitas, a produção total por planta (PTP), e produtividade estimada por planta (PRODT).

Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizou-se o software R Studio. As médias dos fatores foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 1 e 5% de probabilidade.

(a) (b)

Figure 5. Preparo da área em covas (a) e posterior preenchimento com material vegetal (b).

3. Resultados

Ao longo do período experimental houve 324,8 mm de precipitação, enquanto a evapotranspiração de referência (ETo), estimada por Penman-Moteith FAO 56, totalizou 454,3 mm. Em resposta às condições meteorológicas e de acordo com o armazenamento de dados na plataforma desenvolvida houve 137 acionamentos, com tempo variando de 0,61 a 32,52 min (Figura 6).

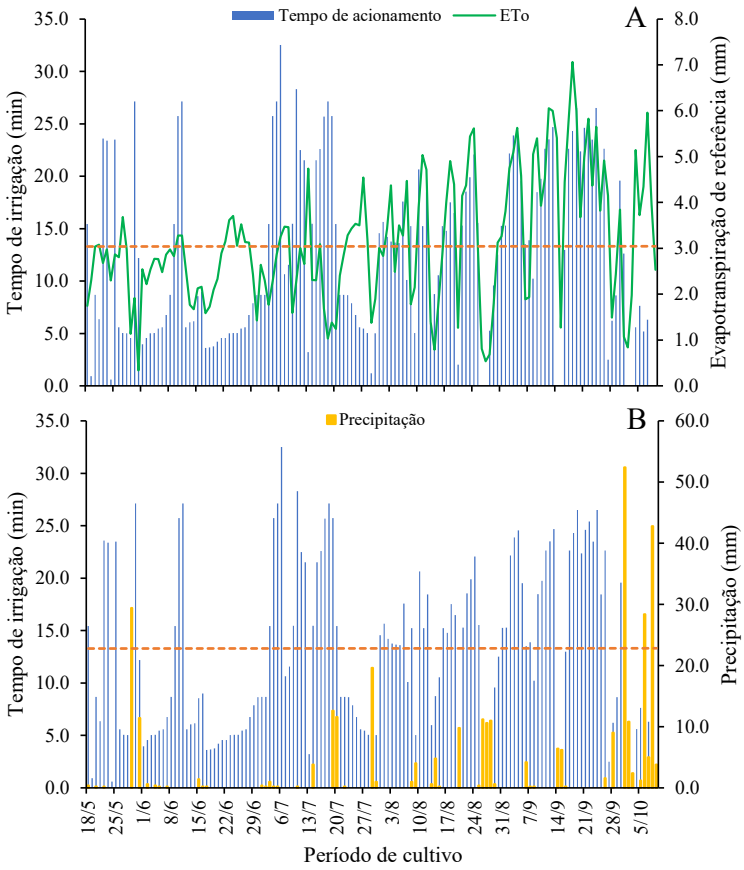
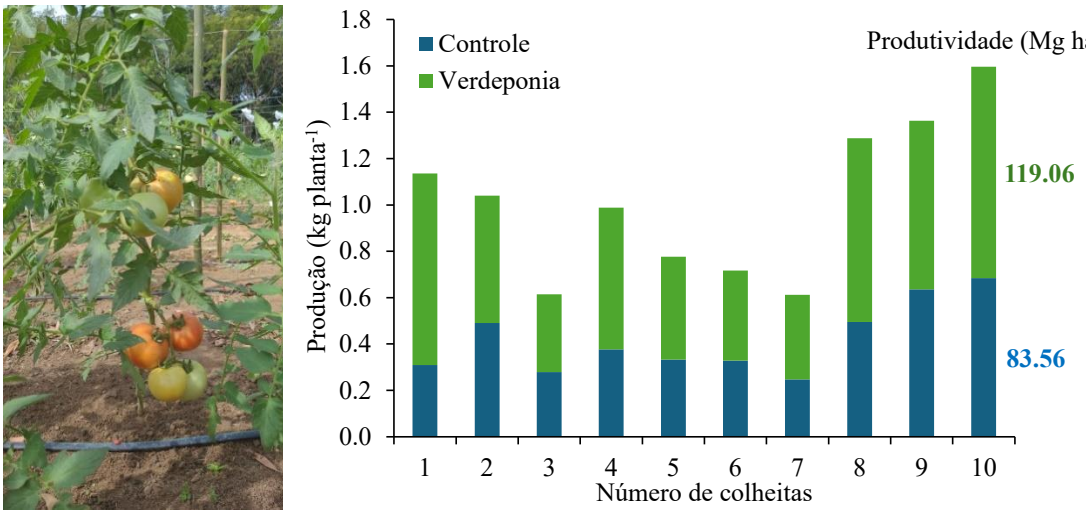


Figura 6. Tempo de acionamento do sistema de irrigação e lâminas de ETo (A) e de precipitação (B).

O tempo médio de acionamento foi de 13,3 min, aplicando um volume médio de 58,48 L por planta. O sistema de irrigação não foi acionado em apenas 7 dias durante todo o período de avaliação, o que evidencia que o sistema de controle da irrigação proporciona irrigação de alta frequência, conforme os requisitos da microirrigação.

Além das características meteorológicas, o sistema foi acionado de acordo com a necessidade hídrica da cultura, que se desenvolveu adequadamente (Figura 7a). No tratamento controle, a produção de tomate variou, em média, de 0,247 a 0,684 kg por planta, enquanto na Verdeponia, a produção variou de 0,335 a 0,912 kg por planta. A produção média total foi de 4,18 e de 5,95 kg por planta, respectivamente, indicando uma produtividade de 83,56 e de 119,06 kg ha^{-1} (Figura 7b).



(a) (b)

Figure 7. Plantas de tomateiro em campo (a) e produção obtida no tratamento controle e no sistema de Verdeponia.

4. Discussão

Ao longo do período de cultivo houve dias sem acionamento do sistema de irrigação (Figura 6), o que não está associado a falhas técnicas, e sim à ocorrência de precipitação. Portanto, o sistema foi capaz de responder tanto à necessidade hídrica da planta quanto à ocorrência de precipitação pluviométrica. Também não foram verificadas falhas de registro das irrigações, o que proporcionou a adequada contabilização do tempo de irrigação e, consequentemente, do volume de água em cada evento de irrigação e em cada tratamento, que é uma informação primordial em estudos que envolvem necessidade hídrica dos cultivos. Os resultados obtidos demonstram que o sistema de controle e monitoramento da irrigação por meio do AAI apresentou um desempenho adequado, atendendo plenamente as necessidades do estudo, tanto no que se refere à coleta das informações necessárias, como quanto à robustez ao longo do tempo de avaliação.

Ressalta-se também que ambos os sistemas, Arduíno e AAI, são de relativamente baixo custo, podendo ser adotados sem necessidade de grande investimento, além de serem robustos e requerem pouca manutenção. Os resultados evidenciam a eficiência do sistema de controle e registro dos eventos de irrigação, que indicam a ocorrência de eventos de irrigação com maior duração na fase de produção de frutos do tomateiro e também de acordo com a evapotranspiração da cultura.

5. Conclusões

O sistema desenvolvido apresentou um desempenho adequado no monitoramento das irrigações ao longo do ciclo, possibilitando o controle e a quantificação da necessidade hídrica do tomateiro.

A plataforma desenvolvida apresentou desempenho satisfatório ao registrar os sinais do AAI e acionar a motobomba e a válvula solenoide. O sistema permitiu o registro dos tempos de irrigação para o cálculo da necessidade hídrica da cultura e posterior comparação com o desenvolvimento das plantas e meteorológicas locais. O principal objetivo do trabalho era a avaliação da plataforma de controle e monitoramento da irrigação, contudo o trabalho também contém dados relevantes acerca da Verdeponia, evidenciando a viabilidade desta técnica de cultivo inovadora que dispensa a compostagem no uso de biomassa vegetal como substrato e adubo de plantas.

Contribuição dos Autores: Conceitualização, D.F.C., M.D.S.R., L.O.M. e M.F.P.; metodologia, D.F.C., M.D.S.R., L.O.M. e M.F.P.; validação, M.D.S.R. e M.F.P.X.X.; análise formal, D.F.C. e M.D.S.R.; investigação, D.F.C. e M.D.S.R.; recursos, D.F.C.; curadoria de dados, M.D.S.R.; redação — preparação do rascunho original, D.F.C. e M.F.P.; redação — revisão e edição, D.F.C., L.O.M. e M.F.P.; supervisão, D.F.C, L.O.M. e M.F.P.; administração do projeto, D.F.C.; aquisição de financiamento, D.F.C. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este trabalho é financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (305919/2022-9).

Agradecimentos: Nós agradecemos à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por viabilizar a infraestrutura necessária ao desenvolvimento do trabalho.

Conflitos de interesse: Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

1. UDDAMERI, V.; CHASEMINEJAD, A.; HERNANDES, E. A. A tiered stochastic framework for assessing crop yield loss risks due to water scarcity undes diferente uncertainty levels. *Agricultural Water Management* 2020, *238*, 106226.
2. CRUZ, E. C.; CORELL, M.; MORIANA, A.; HERNANZ, D.; STINCO, M.; BRAHM, P.; MARTINEZ, J. M. Effect of regulated deficit irrigation on commercial quality parameters, carotenoids, phenolics and sugars of the black cherry tomato (*Solanum lycopersicum* L.) 'Sunchocola'. *Journal of Food Composition and Analysis* 2022, *105*, 104220.
3. INCROCCI, L.; THOMPSON, R. B.; FERNANDEZ, M. D.; PASCALE, S.; PARDOSSI, A.; STANGHELLINI, C.; ROUPHAEL, Y.; GALLARDO, M. Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management* 2020, *242*, 106393.
4. HASNAIN, S.; SINGH, A. Development of electronic wetting front detector for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management* 2022, *274*, 107980.
5. DIAS, G.C.O.; MEDICI, L.O.; VASCONCELLOS, M.A.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C. Papaya seedlings growth using a low-cost, automatic watering controller. *Revista Brasileira de Fruticultura* 2013, *35*, 527-535.

6. GOMES, D.P.; CARVALHO, D.F.; ALMEIDA, W.S.; MEDICI, L.O.; GUERRA, J.G.M. Organic carrot-lettuce intercropping using mulch and different irrigation levels. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 2014, *12*, 323-328.
7. NASCIMENTO, F. A. L.; SILVA, A. J. P.; FREITAS, F. T. O.; FERNANDES, R. D. M.; LUCIO ADERITO VEIMROBER JUNIOR, L. A. Sensors and frequencies of soil water content measurement affecting agro-hydrological simulations and irrigation management. *Computers and Electronics in Agriculture* 2022, *194*, 106763.
8. AL-GHOBARU, H. M.; MOHAMMAD, F. S.; MARAZKY, M. S. A. E.; DEWIDAR, A. Z. Automated irrigation systems for wheat and tomato crops in arid regions. *Water SA* 2017, *43*, 354-364.
9. CAPOBIANCO-URIARTE, M.; APARICIO, J.; VALENCIANO, J. P.; BELMONTE, M. P. The European tomato market: an approach by export competitiveness maps. *PLos* 2021, *16*, 1-27.
10. MEDICI, L. O.; ROCHA, H.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R.A. Automatic controller to water plants. *Scientia Agricola* 2010, *67*, 727–730.
11. SOUZA, E. F. F. S.; MEDICI, L. O.; GENTILE, M. A. D.; HASSANPOURAGHDAM, M. B.; CARVALHO, D. F. SILVA, L. D. B. S. Grass (paspalum notatum) clippings, with and without cattle wastewater, supported production of organic cherry tomatoes in pots. *Biological Agriculture & Horticulture* 2021, *38*, 29-39.

Produção de Cravos de Corte em Resposta e Suplementação Hídrica por Acionamento Automático e Fertirrigação com Água Residuária de Bovinocultura

Daniel Fonseca de Carvalho[1,*], Giovani de Azevedo Silva[2], Letícia Marques da Silva[2], Isaac da Mota Moraes[2], Henrique Vieira de Mendonça[1] and Rogério Gomes Pêgo[3]

Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; carvalho@ufrrj.br (D.F.C.); henriqueufv@gmail.com (H.V.M.)

Discente da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 20230008974@ufrrj.br (G.A.S.); leticia.marques2456@hotmail.com (L.M.S.); isaacmoraes560@ufrrj.br (I.M.M.)

Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; engagropego@yahoo.com.br (R.G.P.)

* Autor de correspondência: carvalho@ufrrj.br; +55 21 98787-7262 (D.F.C.)

Resumo: Neste trabalho avaliou-se o efeito da fertirrigação com água residuária de bovinocultura (ARB) e de volumes de água no crescimento de hastes florais de cravo de corte (*Dianthus caryophyllus* L.). O experimento foi realizado de maio a setembro de 2024, utilizando vasos de 8,0 L dispostos em casa de vegetação. Foram avaliados 4 níveis de suplementação hídrica e 4 doses de fertirrigação. O manejo da irrigação foi realizado com sensores automáticos, em resposta à tensão de água no solo, instalados nas parcelas correspondentes às maiores vazão (3,0 L h^{-1}) e dose de fertirrigação (32 mg N L^{-1} por planta). Foram avaliados a altura (A), o diâmetro (DH) e a massa fresca (MF) das hastes florais, além do diâmetro da flor (DF). Houve 77 irrigações, com aplicação de 12,57 L de água por planta, no tratamento de maior vazão. Os fatores influenciaram isoladamente a altura (modelos polinomiais) e a massa fresca das plantas (modelos lineares), enquanto os valores de DH e DF variaram de 3,57 a 3,75 mm, e de 4,72 a 5,0 cm, respectivamente. É possível concluir que o manejo eficiente da irrigação e uso de ARB tratada favorecem o crescimento das plantas de cravo de corte.

Palavras-chave: manejo da irrigação; planta ornamental; *Dianthus caryophyllus* L.

1. Introdução

A crescente demanda por cultivos ecológicos e sustentáveis de plantas ornamentais tem impulsionado a pesquisa científica a buscar alternativas de produção que minimizem os gastos por impute de insumos e recomendam, entre outras técnicas, o reaproveitamento de resíduos como fonte de novos substratos, o controle biológico de pragas e doenças, uso de fontes alternativas de fertilizantes e o eficiente uso da água de irrigação [1]. Dentre essas, o uso de águas residuárias tem sido recomendada para produção de plantas ornamentais, pois reduz a dependência de fertilizantes sintéticos e oferece vantagens econômicas e ambientais [2].

O reuso da água residuária da bovinocultura (ARB) constitui uma das tecnologias de maior impacto no uso racional desse recurso o que caracteriza uma economia circular, conceito que abrange a conversão de resíduos em nutrientes, fechamento de ciclos e o respeito socioambiental [3,4]. Estudos confirmam que os nutrientes presentes ARB possibilitam a nutrição de planas ornamentais como gérbera e girassol [5,6].

Outro importante fator de produção que afeta diretamente a qualidade de plantas ornamentais é a disponibilidade hídrica. Plantas crescidas sob condições de déficit hídrico intenso produzem hastes florais curtas e flores menores, incompatíveis para comercialização [7-10]. A adequada disponibilidade hídrica no cultivo de planta é importante para manter o turgor dos tecidos vegetais e possibilitar a nutrição via fluxo de nutrientes minerais do substrato de cultivo [11].

Uma das espécies ornamentais mais cultivadas em todo o mundo é cravo (*Dianthus caryophyllus* L.) cuja comercialização é majoritariamente como flor de corte ou plantas envasadas [12]. Por isso os métodos de cultivo devem garantir alta produtividade de flores com elevado valor estético como, por exemplo, o crescimento vigoroso da haste floral, boa produtividade de flores e hastes florais mais rígidas.

Estudos anteriores mostram que o gênero *Dianthus* conseguem se adaptar às condições de déficit hídrico, possibilitando sua sobrevivência quando crescidas em solos mais secos, sendo essa uma importante característica para a sobrevivência dessas plantas em ambientes de ocorrência natural [13]. No entanto, para atender o exigente mercado da floricultura é importante que as flores produzidas apresentam alto valor estético. Por isso, é importante suprir as demandas hídricas da planta de cravo ou ainda as cultivas sob condições de déficit hídrico controlado, condições que otimiza o uso da água em sistemas agrícolas, sem afetar a produtividade ou a qualidade de plantas [14].

São escassos os trabalhos científicos que buscam estabelecer métodos sustentáveis para a produção de cravos, sobretudo da eficiência de águas residuárias da bovinocultura como alternativa de nutrição e os impactos do cultivo sob déficit hídrico sobre a qualidade de hastes florais. Por isso, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da fertirrigação com água residuária de bovinocultura (ARB) e de volumes de água no crescimento de hastes florais de cravo de corte (*Dianthus caryophyllus* L.).

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Setor de Horticultura da UFRRJ (Seropédica, RJ, Brasil) (latitude 22º 45'48" S; longitude 43º 41' 19" W; altitude de 33,0 m). As mudas foram preparadas em bandejas plásticas com 128 células preenchidas com substrato comercial (Carolina Soil®), utilizando sementes comerciais de cravo 'Chabaud Gigante' de flores dobradas vermelhas (Isla®, Brasil).

A semeadura foi realizada no dia 22 de abril de 2024 em bancadas de apoio e, em 24 de maio, as plântulas foram transportadas e alocadas em vasos de 8,0 L que foram devidamente preparados e conectados ao sistema de abastecimento de modo a garantir a irrigação das plantas (Figura 1a).

(a) (b)

Figura 1. Mudas de cravo transplantadas nos vasos (a) e layout do ensaio experimental (b).

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualisados, em esquema fatorial 4x4, com 5 repetições e com três plantas por parcela experimental (vaso), totalizando 240 mudas em 80 vasos (Figura 1b). Os tratamentos consistiram

na aplicação de diferentes volumes de irrigação (fator 1), a partir de emissores (PCJ-LCNL/Netafim) com vazão nominal de 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 L h^{-1}. O manejo da irrigação foi realizado de forma automática com o uso do Acionador Automático de Irrigação (ASI) [15], que opera em resposta a tensão da água no solo permitindo a aplicação da água em resposta à necessidade hídrica das mudas (Figura 2).

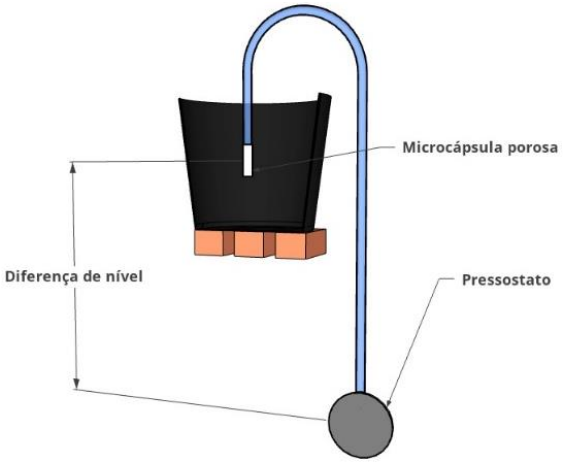


Figura 2. Detalhes construtivos e operacionais do acionador automático para irrigação (AAI).

O fator 2 foi caracterizado por doses de fertirrigação com ARB tratada biologicamente com microalgas da espécie Spirulina platenses, produzidas por inoculação em fotobiorreatores. Essas doses foram aplicadas em função das exigências nutricionais da cultura, análise nutricional do solo (substrato) e análise química da ARB. A partir disso foram determinadas as doses de 100, 75, 50 e 0 %, equivalendo a 32, 24, 16 e 0 mg N L^{-1} por planta. Esse processo de aplicação da fertirrigação totalizou 33,80 L de ARB tratada diluída e aplicada em 4 doses ao longo do desenvolvimento da cultura.

O comprimento da haste principal ou altura máxima da planta foi monitorado em intervalos regulares até o ponto de corte, quando as hastes atingiram o padrão comercial, correspondente à plena abertura do botão floral da haste principal. Neste momento foram então determinados os parâmetros fitotécnicos relacionados a comprimento da haste (altura), o diâmetro (DH) e a massa fresca (MF) das hastes florais, além do diâmetro da flor (DF). A Figura 3 ilustra o experimento em diferentes etapas fenológicas das plantas de cravo.

(a) (b)

Figura 3. Plantas de cravo no período de crescimento vegetativo (a) e na fase de floração (b).

Os dados foram tabulados e submetidos a análises estatística. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade foi verificada pelo teste de Bartlett, ambos considerando um nível de significância de 5%. Posteriormente, foi realizada uma análise de variância (Two-way ANOVA) para investigar as diferenças entre os tratamentos avaliados. Quando significativas, foram realizadas análises de regressão entre as variáveis independentes (níveis de irrigação e doses de fertilização à base de água residuária) e as variáveis avaliadas, com uso do software estatístico R.

3. Resultados

Nos primeiros 12 dias após transplantio, as mudas foram irrigadas de forma manual, sendo aplicados volumes correspondentes à evapotranspiração de referência, totalizando 0,348 L por planta. A partir de 07 de junho iniciou-se o manejo automatizado da irrigação (Figura 4), que apresentou 76 acionamentos, com um volume médio aplicado de 12,57 L por planta para o tratamento controle (V4), considerando as diferentes doses de fertirrigação. Os demais tratamentos do fator 1 receberam, em média, 7,86 (V1), 9,07 (V2) e 9,94 L (V3). A ETo média ao longo do ciclo experimental foi de 3,25 mm e o volume médio aplicado foi de 0,22 L por planta.

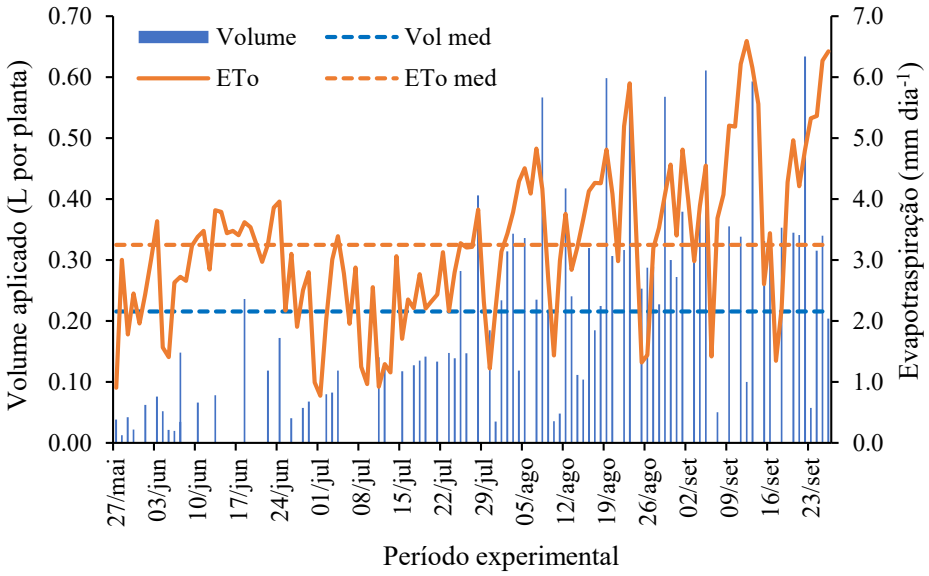


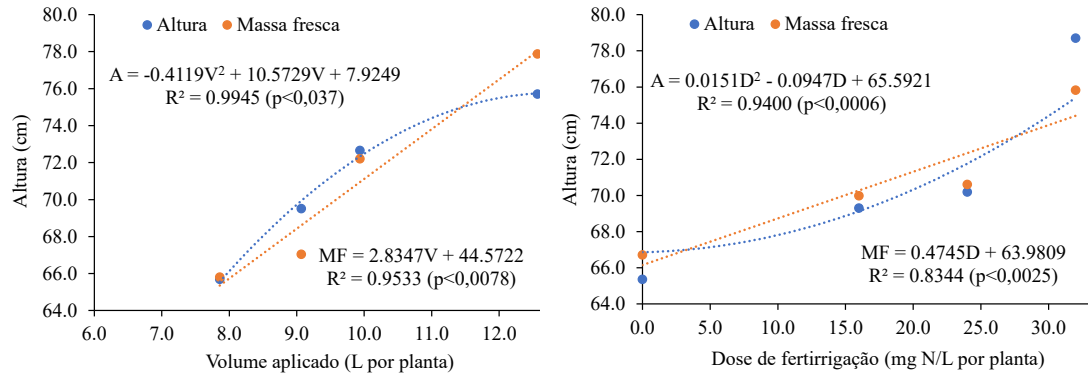
Figura 4. Volumes de água aplicados e evapotranspiração de referência (ETo) ao longo do experimento..

Houve efeito significativo dos fatores avaliados no comprimento da haste principal (altura) e na massa fresca das hastes (Figura 5). Foram ajustados modelos polinomiais para comprimento da haste principal (altura) e modelos lineares para massa fresca da haste floral. Por outro lado, o diâmetro das hastes florais bem como o diâmetro das flores de cravo não foram influenciados pela suplementação hídrica e doses de fertirrigação, e apresentaram valores que variaram, respectivamente, de 3,57 a 3,75 mm, e de 4,72 a 5,0 cm.

4. Discussão

O volume de água aplicado nos primeiros 12 dias de ciclo foi pequeno em função de uma ETo acumulada de 24,8 mm (2,1 mm dia^{-1}) (Figura 4). Os maiores volumes de água foram aplicados a partir do início do mês de agosto, com lâmina total de ETo até o final do ciclo de 229,2 mm. Antes dessa data, a ETo acumulada foi de 170,5 mm. Portanto, é possível constatar o aumento do volume de água aplicado e da frequencia de acionamento do sistema de irrigação em função do aumento da ETo e, consequentemente, da necessidade hídrica da cultura, quando as plantas estão mais desenvolvidas, com maior massa vegetal e demanda para florescimento.

As plantas ornamentais são valorizadas pelo seu aspecto estético e especificamente para flores de corte um dos principais parâmetros é a altura (comprimento) da haste floral, sendo que as hastes maiores são mais valorizadas no mercado [16].



(a) (b)

Figure 5. Variação dos valores de comprimento da haste principal (altura) e de massa fresca das hastes florais em resposta aos volumes (V) de água aplicados (a) e às doses (D) de fertirrigação (b).

O crescimento de plantas em altura e o acúmulo de biomassa é especialmente afetado pela adequada nutrição das plantas (Figura 5). A fertilização das plantas tem papel fundamental na determinação do tamanho das hastes florais, para flores de corte seja pela menor disponibilidade que leva à produção de flores de baixa qualidade, quanto pelo excesso de nutrientes que pode causar fitotoxidez [17].

No presente estudo, houve uma correlação positiva entre o aumento das doses aplicadas de água residuária de bovinocultura e o aumento do comprimento da haste floral e da biomassa produzida (Figura 5b), indicando que a água residuária na concentração em que se apresentava continha teores de nutrientes adequados para a planta. Estudos mostram que a fertirrigação com irrigação com água residuária em cultivos hortícolas mostrou-se efeitos positivos em devido ao aumento da disponibilidade de nutrientes, em especial o nitrogênio além de fósforo e potássio [18-19].

A maior restrição hídrica também afeta o crescimento da haste floral, em parte devido às condições ambientais estressantes, reduzindo a capacidade fotossintética o que leva à produção plantas e hastes florais de menores, como foi detectado para as culturas de zinia e gladíolo [20,10] (Figura 5a). Além disso, o estresse hídrico intenso provoca múltiplas respostas fisiológica em plantas de cravo causando levando à redução no crescimento vegetativo, do potencial hídrico foliar, do conteúdo relativo de água, a condutância estomática e a taxa de transpiração [14]. Vale ainda ressaltar que a disponibilidade de água no solo afeta diretamente a difusão de macro e micronutrientes [21], ou seja, para que os nutrientes estejam disponíveis para serem absorvidos e translocados pelas plantas é necessário a adequada irrigação do substrato de cultivo [22].

Esses resultados indicam que é possível a produção sustentável de cravos, utilizando água residuária de bovinocultura, como uma alternativa à fertilização mineral. No entanto, é importante otimizar o manejo da irrigação das plantas para

obter flores de alta qualidade. Diante disso, e com vistas a crescente demanda de produção de flores, esse trabalho sinaliza para a possibilidade da integração entre a floricultura e a pecuária que pode trazer soluções ambientalmente mais sustentáveis.

5. Conclusões

É possível concluir que o manejo eficiente da irrigação e uso de água residuária de bovinocultura tratada favorecem o crescimento das plantas de cravo de corte, gerando hastes florais de qualidade.

Contribuição dos Autores: Conceitualização, D.F.C., H.V.M e R.G.P.; metodologia, D.F.C., H.V.M e R.G.P.; validação, D.F.C., G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.; análise formal, D.F.C., G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.; investigação, G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.D.F.C. e M.D.S.R.; recursos, D.F.C.; curadoria de dados, D.F.C., G.A.S., L.M.S. e I.M.M.; redação — preparação do rascunho original, D.F.C., G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.; redação — revisão e edição, D.F.C. e R.G.P.; supervisão, D.F.C. e R.G.P.; administração do projeto, D.F.C.; aquisição de financiamento, D.F.C. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este trabalho é parte integrante do projeto "Reutilização de água para irrigação: produção de flores e de espécies arbóreas de Mata Atlântica utilizando acionamento automático, substrato com lodo de esgoto e água residuária tratada de bovinocultura", financiado pela FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro) (E-26/200.388/2023 e E-26/210.155/2023) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (305919/2022-9).

Agradecimentos: Nós agradecemos à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, especialmente aos técnicos do Setor de Horticultura do Instituto de Agronomia, pelo apoio dispensado na condução deste trabalho.

Conflitos de interesse: Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

1. LALLAWMZUALI, R.; PAL, A. K. Efficacy of Eco-Friendly Biostimulants in Enhancing the Performance of Ornamental Crops: A Review. *Chem Sci Rev Lett* 2023, *12*, 145-152.
2. NAGIAL, K. S.; KUMAR, N.; PODDAR, A. A comprehensive analysis of institutional wastewater for irrigating ornamental plants. *Water Supply* 2024, *24*, 2830
3. BRAGA, M. B.; MAROUELLI, W. A.; LIMA, C .A. P. Reuso de água como fator na produção agrícola. In: Reuso de água na agricultura. Ed. Braga, M.B & Lima, C.E.P. Embrapa Hortaliças, Brasília-DF, 2014. 202 p.
4. LIMA, P. M.; MORAIS, M. F.; CONSTANTINO, M. A.; PAULO, P. L.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C. Environmental assessment of waste handling in rural Brazil: Improvements towards circular economy. *Clean Environ Syst.* 2021, *3*, 1-9.
5. COVA, A. M. W.; SANTOS, A. L.; SOUZA, M. G.; SILVA, L. L.; AZEVEDO NETO, A. D.; GHEY, H. G. Wastewater as a source of water and nutrients in the cultivation of ornamental sunflower. *GEAMA, Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology* 2021, *7*, 61-66.
6. MANTOVANI, J. R.; SILVEIRA, L. G; LANDGRAF, P. R. C.; SANTOS, A. R.; COSTA, B. S.. Phosphorus rates and use of cattle manure in potted gerbera cultivation. *Ornamental horticulture* 2017, *23*, 412-418.

7. AYDINSAKIR, K.; OZCELIK, A.; BUYUKTAS, D.; TUZEL, I. H. Quality Characteristics of Drip Irrigated Carnation (Dianthus caryophyllus L. cv. "Eilat") under Protected Conditions. *Acta Hortic*. 2009, *807*, 307-312.
8. UCAR, Y.; KAZAZ, S.; ASKIN, MA.; AYDINSAKIR, K.; KADAYIFCI, A.; SENYIGIT, U. Determination of irrigation water amount and interval for carnation (Dianthus caryophyllus L.) with pan evaporation method. *HortScience* 2011, *46*, 102– 107.
9. KAZAZ, S.; UCAR, Y.; ASKIN, M. A.; AYDINSAKIR, K; SENYIGIT, U.; KADAYIFCI, A. Effects of different irrigation regimes on yield and some quality parameters of carnation. *Scientific Research and Essays* 2010, *5*, 2921-2930.
10. MOREIRA, K. F. A.; PÊGO, R. G.; SCHULTZ, N.; MEDICI, L. O.; CARVALHO, D. F. Production, quality, and longevity of zinnia cultivated under silicate fertilization and water restriction. *Ciênc. Agrotec*. 2025, *49*, e021424.
11. THOMAS, S. L.; BINDHU, J. S.; PILLAI, S. P.; BEENA, R.; BIJU, J.; SARADA, S. Nutrient Dynamics and Moisture Distribution under Drip Irrigation System. *Journal of Experimental Agriculture International* 2024, *46*, 485-493.
12. WANG, M.; NI, C.; WANG, R.; ZHONG, L.; CHENG, Y.; BAO, M.; ZHANG, F. Variation in longevity of cut and in planta flowers of potted carnation varieties affected by their relationship with ethylene and water. *Ornamental Plant Research* 2023, *3*:2.
13. REUT, A.; UZYANBAEVA, L. Features of the water regime of some species of the genus Dianthus L. in the South-Ural Botanical Garden (Ufa). *BIO Web of Conferences* 2024, *128*, 00034.
14. ÁLVAREZ, S.; NAVARRO, A.; BAÑÓN, S.; SÁNCHEZ-BLANCO, M. J. Regulated deficit irrigation in potted Dianthus plants: Effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses. *Scientia Horticulturae* 2009, *122*, 579–585.
15. MEDICI, L. O.; ROCHA, H.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R.A. Automatic controller to water plants. *Scientia Agricola*, 2010, *67*, 727–730.
16. MARTINS, R. C. F.; PÊGO, R. G.; CRUZ, E. S.; ABREU, J. F. G.; CARVALHO, D. F. Production and quality of zinnia under different growing seasons and irrigation levels. *Ciência e Agrotecnologia* 2021, *45*, e033720.
17. FURTINI NETO, A. E.; BOLDRIN, K. V. F.; MATTSON, N. S. Nutrition and Quality in Ornamental Plants. *Ornamental Horticulture* 2015, *21*, 139-150.
18. SENA, C. C. R.; FERREIRA, A. A.; SILVA, V. C. R. Mudança dos atributos químicos do solo após aplicação de água. *Revista de Biotecnologia & Ciência* 2020, 9, 1-10.
19. OLIVEIRA, M. L. A.; PAZ, V. P. S.; GONÇALVES, K. S.; OLIVEIRA, G. X. S. Crescimento e produção de girassol ornamental irrigado com diferentes lâminas e diluições de água residuária. *Irriga* 2017, *22*, 204-219.
20. SANTOS, J. J. S.; PÊGO, R. G.; COUTO, B. R. M.; BUENO, M. M.; CARVALHO, D. F. Evaluation of water requirement, commercial quality, and yield response factor of gladiolus produced with automated irrigation in different growing periods. *Ciência e Agrotecnologia* 2020, *44*, e017220.
21. SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; COMERFOR, N. B. Diffusive fluxes of phosphorus, potassium and metallic microelements as affected by soil compaction. *COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS* 2018, *49*, 2369–2378.
22. CAMPOS, A. J. M.; MEDEIROS, S.; NACARATH, I R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. *Research, Society and Development* 2021, 10, e311101523155.

Aporte de Nitrogênio no Desenvolvimento de Aveia-Preta pela Aplicação do Efluente Tratado de Abatedouro

Fabrício Rossi [1*], Lucas Renato Trevisan [2], Lisiane Brichi [3], Ana Carolina Murad Lima [4], Tamara Maria Gomes [5]

[1] Universidade de São Paulo/Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimento; fabricio.rossi@usp.br

[2] Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; lucas.renato.trevisan@alumni.usp.br

[3] Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; lisiane.brichi@alumni.usp.br

[4] Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; ana.murad.lima@usp.br

[5] Universidade de São Paulo/Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimento; tamaragomes@usp.br

* Correspondente: fabricio.rossi@usp.br; Tel.: (55 19 3565-4189)

Resumo: O efluente do abatedouro apresenta alta carga orgânica e aparece como fonte de nitrogênio e potássio, o que faz dele uma alternativa no suprimento de nutrientes para produções vegetais. A aveia-preta (*Avena strigosa*), além de seu potencial forrageiro para diversas espécies animais, pode ser utilizada como planta de cobertura, em sistemas de rotação de culturas e de plantio direto. Para este trabalho foram utilizados cinco tratamentos, a partir de dosagens de efluente tratado de abatedouro (ETA): 0% ETA (controle), 100% ETA, 75% ETA, 50% ETA e 25% ETA. No controle foi aplicado nitrogênio por fertilizante químico, na dose recomendada para a cultura (100 kg ha^{-1}). A área experimental é composta por 20 parcelas de 8 m por 8 m, separadas em quatro blocos. Para avaliação da biomassa, ao longo do crescimento (quatro cortes), foram coletadas amostras em esquadros de 0,25 cm^2, aleatoriamente em quatro locais da parcela, totalizando assim uma amostra composta de 1 m^2. O aporte de diferentes concentrações de nitrogênio não influenciou na produtividade total da biomassa. Foi ajustada uma regressão de segundo grau para o acúmulo de biomassa ao longo do tempo. A aplicação de efluente tratado de abatedouro é uma alternativa técnica viável e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: *Avena strigosa*; fertilidade do sistema; reúso agrícola.

1. Introdução

O efluente do abatedouro apresenta alta carga orgânica e aparece como uma rica fonte de nitrogênio e potássio, o que faz dele uma alternativa no suprimento de

nutrientes para produções vegetais. Devido à presença de grandes concentrações de matéria orgânica, a sua disponibilidade em corpos hídricos pode causar graves problemas ambientais. No entanto, a alta concentração de nitrogênio pode ser utilizada como fonte deste nutriente nas demandas das culturas, aliado ao fornecimento de água. [1] demonstraram a eficácia do uso de efluente tratado de abatedouro, com tratamento realizado em um reator UASB, e aplicação através de irrigação por aspersão. Resultados demonstraram que a pastagem apresentou status nutricional adequado durante todo o ciclo produtivo. O valor médio de nitrogênio presente no efluente tratado de abatedouro foi de 176 mg L^{-1}.

A aveia é considerada uma das mais importantes gramíneas de inverno ao redor do mundo, sendo no Brasil uma das forrageiras mais utilizadas tanto como planta de cobertura [2] quanto para suplementação na alimentação animal {3, 4]. A aveia-preta pode ser utilizada como um adubo verde, sendo muitas vezes empregada em sistemas de sucessão de cultivos. De acordo com [5] a aveia-preta traz benefícios químicos e físicos para o solo, fazendo com que a cultura semeada em sua sucessão apresente maior rendimento. A aveia-preta, além de trazer benefícios para o solo, pode também ser aplicada com sucesso para reduzir infestação de invasoras. Motivos estes que colocam a aveia-preta como uma cultura de interesse em estudos e aplicações comerciais.

Deste modo, o objetivo deste trabalho foi estudar o desenvolvimento e a produção da aveia-preta irrigada com efluente tratado de abatedouro como fonte de água e nutrientes, principalmente o nitrogênio.

2. Material e Métodos

A área experimental é localizada no Campus USP “Fernando Costa”, em Pirassununga/SP. A localização geográfica do campus é 21°59’ de latitude sul e 47°23’ de longitude oeste e apresenta altitude média de 635 metros, com declividade. O clima é Cwa na classificação Koppen, temperatura e precipitação médias anuais de 20,8°C e 1298 mm, respectivamente. O solo no local é classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico [6]. A área experimental é composta por 20 parcelas de 8 m por 8 m (64 m²), separadas em quatro blocos perpendiculares à declividade do terreno (Figura 1).

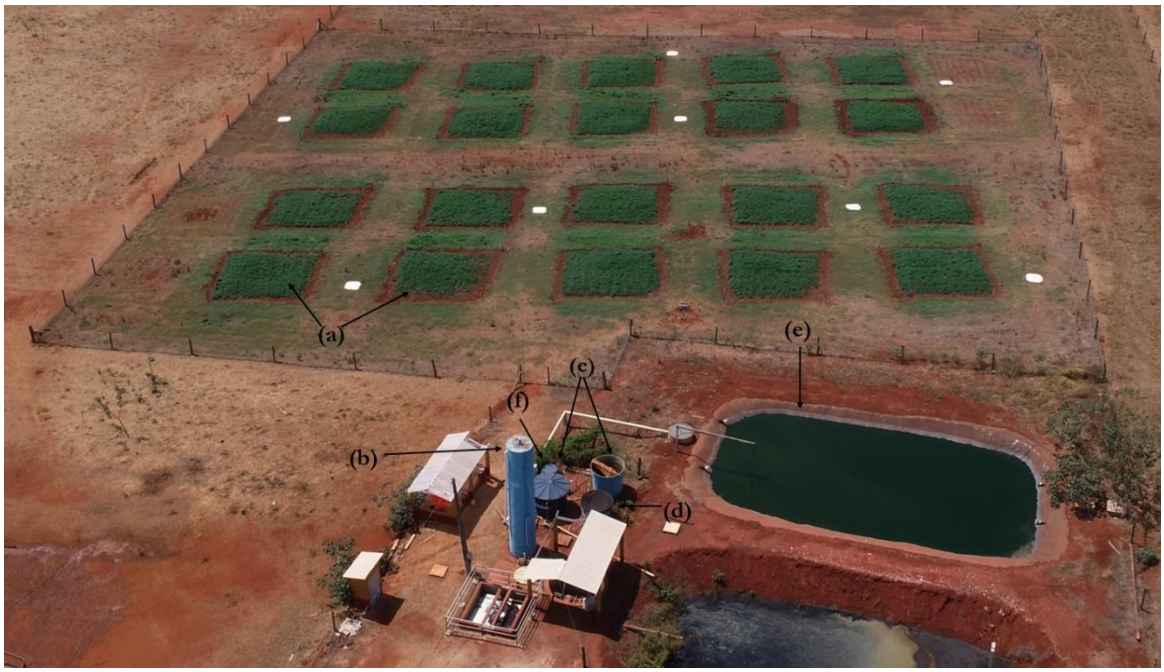


Figura 1. Área experimental campus USP "Fernando Costa". (a) Parcelas experimentais; (b) Reator UASB; (c) Caixas de armazenamento de efluente; (d) Caixa de armazenamento de água; (e) Lagoa de efluente tratado de abatedouro e (f) Controladores do sistema de irrigação.

Foram utilizados 5 tratamentos com diferentes variações da quantidade de nitrogênio fornecidas para a cultura com a partir de diferentes dosagens de efluente tratado de abatedouro (E), a saber: (T1) 0% E, (T2) 100% E, (T3) 75% E, (T4) 50% e (T5) 25% E. O tratamento T1 foi a testemunha, na qual não foi aplicada aplicado o efluente e o nitrogênio foi o a dose recomendada para a cultura (100 kg ha^{-1}), aplicado via ureia. Os tratamentos foram aplicados através de irrigação por aspersão em combinações adequadas de água e efluente visando as diferentes doses de efluente (nitrogênio - N), de acordo com os dados apresentados na Tabela 4. As parcelas experimentais receberam adubação com Fósforo e Potássio seguindo as recomendações para a cultura e de acordo com resultados da análise de solo da área experimental.

O experimento foi realizado com aveia-preta (*Avena strigosa*), cultivar Embrapa-29, sendo a semeadura realizada com densidade de 100 kg ha^{-1}.

A irrigação foi conduzida utilizando-se um sistema de irrigação por aspersão convencional, com aspersores de impacto setorial reguláveis (Senninger, modelo 3123-1PC), com vazão igual a 0,5 m^3 h^{-1} e instalados a 1,0 m de altura do nível do solo. Cada parcela experimental contou com dois aspersores localizados transversalmente nas extremidades das parcelas experimentais com um ângulo operacional de 90°. A necessidade de irrigação foi determinada utilizando-se um sensor de reflectometria no domínio da frequência (do inglês, FDR) (Sentek, modelo Diviner 2000), contendo uma haste de 1,6 m com um sensor capacitivo conectado a

um coletor de dados. O manejo foi realizado três vezes por semana a cada dois dias. O sensor capacitivo foi inserido nos tubos de acesso localizados na região central das parcelas dos blocos um, dois e quatro, a profundidades de 0,0 a 0,5 m com valores coletados a cada 0,1 m. Os valores de umidade obtidos foram então inseridos em uma planilha de manejo para determinação dos tempos de irrigação para suprir a demanda hídrica.

O efluente utilizado para irrigação da aveia-preta foi proveniente do processo de abate no Abatedouro Escola da prefeitura do Campus USP "Fernando Costa", de Pirassununga/SP. O efluente foi tratado por meio de um reator tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanked*) e posteriormente armazenado em uma lagoa impermeabilizada (lagoa de polimento). A partir da lagoa, o efluente foi bombeado para os reservatórios de onde foi aplicado às parcelas pelo sistema de irrigação.

Amostras foram coletadas durante a condução dos experimentos para a caracterização do efluente tratado de abatedouro ao longo dos anos produtivos de 2020 e 2021 a fim de conhecer sua composição quando a condutividade elétrica, pH, N-NTK, $N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_3^-$, $N\text{-}NO^{2-}$, $P\text{-}PO_4^-$, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, pela metodologia apresentada por [7]. Foi determinada a razão de absorção de sódio (RAS) seguindo o indicado [8]. A partir das amostras coletadas, também foi obtido os valores da demanda química total e solúvel de oxigênio (DQO). Os testes de caracterização foram realizados no Laboratório de Biotecnologia Ambiental/FZEA/USP.

Para avaliação da fitomassa, ao longo do crescimento, foram feitos quatro cortes: aos 30 dias após emergência (DAE), 45 DAE, 60 DAE e 100 DAE. As amostras foram coletadas em quadrados de 0,25 cm², aleatoriamente em quatro locais da parcela, totalizando assim uma amostra composta de 1 m², sendo as plantas cortadas com tesoura de jardinagem rente ao solo. Essas amostras foram unidas, misturadas e uma subamostra de aproximadamente 300 g foi selecionada ao acaso para determinação da fitomassa. Essas amostras foram levadas ao laboratório, pesadas para determinação de massa fresca (MF), lavadas e submetidas ao processo de secagem em estufa de ventilação forçada de ar (Tecnal, modelo TE-394-1) à 65°C por 48 h para determinação de massa seca (MS). Após a determinação da MS, as amostras secas em estufa foram moídas em um moinho de facas tipo Willye (7 lab, modelo 920 Willye) utilizando peneira de 1 mm. As amostras moídas foram colocadas em embalagens plásticas, identificadas e submetidas a análise química foliar no Laboratório de Ciências Agrárias e Solos do departamento de Zootecnia da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga/SP. A análise química foliar foi realizada para obtenção das concentrações de macro e micronutrientes, a saber: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca),

magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e sódio (Na).

3. Resultados

A caracterização do efluente tratado de abatedouro (ETA), o aporte do nitrogênio a partir do ETA aplicado e produção da fitomassa seca da aveia-preta são apresentados a seguir.

3.1. Efluente tratado de abatedouro (ETA)

O efluente tratado de abatedouro (ETA) apresentou 53,27 mg L^{-1} de nitrogênio total (Kjeldhal), 31,93 mg L^{-1} na forma de amônio (NH_4^+) e 1,03 mg L^{-1} na forma de nitrato (NO_3^-), enquanto que a água não apresentou nitrogênio na forma de amônio (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização do efluente tratado de abatedouro (ETA) e da água, utilizados na irrigação.

Parâmetros	**ETA**	**Água**
$N-NTK$ (mg L^{-1})	53,27	1,68
$N-NH_4^+$ (mg L^{-1})	31,93	0
$N-NO_3^-$ (mg L^{-1})	0,80	0,88
$N-NO_2^-$ (mg L^{-1})	0	0
Ca^{2+} (mg L^{-1})	21,58	19,09
Fe^{2+} (mg L^{-1})	0,82	<0,02
Mg^{2+} (mg L^{-1})	2,19	0,57
Parâmetros	**ETA**	**Água**
Mn^{2+} (mg L^{-1})	0,12	<0,02
S (mg L^{-1})	4,03	<0,02
Na^+ (mg L^{-1})	27,98	<0,80
K^+ (mg L^{-1})	14,02	0,80
$P-PO_4^-$ (mg L^{-1})	5,55	0,08
pH	7,81	6,39
CE (dS m^{-1})	0,55	0,09
$RAS(mmol/L)^{-\frac{1}{2}}$	1,35	0,05
DQO	507,34	249,66

ETA- Efluente tratado de abatedouro; CE-condutividade elétrica; RAS-razão de absorção de sódio; NTK-Nitrogênio total Kjeldhal.

3.2. Aporte de nitrogênio

Em função do volume aportado de efluente e da água, em cada tratamento, foram fornecidas quantidade de nitrogênio que variaram de 52,58 kg ha^{-1} no tratamento com 25% ETA a 188,15 kg ha^{-1} em 100% ETA (Tabela 2). O tratamento T1 (0% ETA) recebeu adubação através de ureia, na dosagem total de 100 kg ha^{-1} de N.

Tabela 2. Volume da água e do efluente tratado de abatedouro (ETA) nos diferentes tratamentos e o aporte total de nitrogênio.

Tratamento	Água	ETA	Nitrogênio
	---------- mm ----------		--- Kg ha^{-1} ---
0% ETA	347,96	0	0
100% ETA	0	347,96	188,15
75% ETA	88,92	262,91	144,43
50% ETA	161,61	161,61	91,52
25% ETA	257,49	85,06	52,58

Em relação ao teor de nitrogênio foliar, independentemente do aporte pela aplicação do efluente (ETA), não houve diferença entre os tratamentos, apresentando maiores valores no primeiro corte e diminuindo ao longo do tempo (Tabela 3).

Tabela 3. Médias das concentrações de nitrogênio (g kg^{-1}) foliares na aveia-preta, em relação aos tratamentos (% ETA) e dos cortes.

Corte	0% ETA	100% ETA	75% ETA	50% ETA	25% ETA	Média
1	44,38	46,32	46,97	45,95	42,70	**45,26**
2	36,89	38,35	38,65	39,13	36,00	**37,80**
3	26,21	27,27	36,8	28,71	29,34	**29,67**
4	22,62	31,59	26,35	27,00	24,35	**26,38**

Corte 1: 30 dias após emergência (DAE); Corte 2: 45 DAE; Corte 3: 60 DAE e corte 4: 100 DAE

3.3. Produção da Fitomassa Seca da Aveia-Preta

Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para produção de fitomassa seca. A Figura 2 apresenta o resultado da análise de regressão de segundo grau, mostrando o acumulado da fitomassa ao longo do tempo.

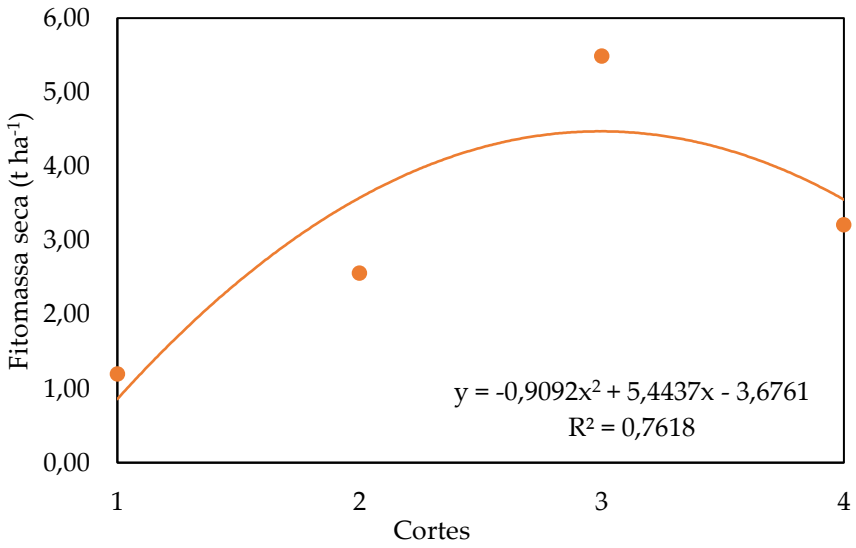


Figura 2. Fitomassa seca da aveia-preta, em relação aos quatro cortes (30, 45, 60 e 100 dias após emergência).

4. Discussão

A dosagem de 50% de efluente tratado de abatedouro (ETA) aportou semelhante quantidade de nitrogênio (91,52 kg ha^{-1}) a quantidade aportada no tratamento testemunha (100 kg ha^{-1}). Doses maiores (75% ETA e 100% ETA) e doses menores (25% ETA) não influenciaram na produção de fitomassa seca e o teor de nitrogênio nas folhas.

Reúso do efluente tratado de abatedouro em capim coastcross (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) [1] demonstrou o uso potencial como fonte alternativa de água e suprimento total de nitrogênio para produção de feno. A entrada de nitrogênio por águas residuais manteve a produção, o status nutricional e bromatológico, sem a necessidade de suplementação de nitrogênio, em condições climáticas tropicais.

Em estudo da aplicação de ETA em soja, os autores relataram que rendimento não foi significativamente afetado pelas diluições de efluente, destacando a influência dominante de fatores ambientais [9].

Pesquisas futuras são necessárias para investigar a dinâmica de solutos no sistema solo-planta-água, pela entrada de concentrações subsequentes de nitrogênio e sódio, pela irrigação com efluentes tratados de abatedouro em culturas de interesse agrícola.

5. Conclusões

As doses de efluente utilizadas na irrigação da aveia-preta, aplicadas para fornecimento de nitrogênio, não influenciaram na produção de fitomassa e nos

teores de nitrogênio foliares, ou seja, foi possível substituir com eficiência a água de abastecimento pelo efluente tratado de laticínio, sem perda de produção e com economia da adubação nitrogenada.

Author Contributions: Conceitualização, L.R.T. e F.R.; metodologia, L.R.T. e F.R.; software, L.R.T.; validação, F.R., T.M.G. e L.B.; análise formal, F.R. e L.R.T.; investigação, L.R.T. e L.B.; curadoria de dados, L.R.T.; redação — preparação do rascunho original, L.R.T.; redação — revisão e edição, L.R.T., F.R., L.B. e T.M.G.; supervisão, F.R.; administração do projeto, F.R.; aquisição de financiamento, F.R. e T.M.G.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), bolsa número 88882.378441/2019-01.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos e Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo. Os autores também agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. Menegassi, L.C.; Rossi, F.; Dominical, L.D.; Tommaso, G., Montes, C.R.; Gomide, C.A.; Gomes, T.M.; Reuse in the agro-industrial: Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass. *J. Clean. Prod.* **2020**, 251, 119698. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119698
2. Gabriel Filho, A.; Pessoa, A.C.S.; Strohhaecker, L.; Helmich, J.J. Differences between convencional and minimum tillage soil preparation for cassava cropping with *Vicia sativa* and *Avena strigosa* green manure *Cienc. Rural.* 2000, 30, 953–957. https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000600005
3. Cassol, L.C.; Piva, J.T.; Soares, A.B.; Assmann, A.L. Produtividade e composição estrutural de aveia e azevém submetidos a épocas de corte e adubação nitrogenada. *Revista Ceres*, 2011, 58, 438–443. https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000400006
4. Ferolla, F.S.; Vásquez, H.M.; Silva, J.F.C.; Viana, A.P.; Domingues, F.N.; Lista, F.N. Chemical composition and carbohydrate and protein fractionation of black-oat and triticale under harvest or grazing. 2008. *R. Bras. Zootec.*, 37, 197–204. https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000200004
5. Machado, L. A. Z. Aveia: Forragem E Cobertura Do Solo. Embrapa Agropecuária Oeste - Coleção Sistema Plantio Direto, Brasil, 2000. p. 16
6. Santos, H.G. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 Brasília: Embrapa, 2018, 356 p.
7. Apha, A. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington, 2012.
8. Ayers, R.S.; Westcot, D.W. Water quality for agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
9. Murad Lima, A.C.; Brichi, L.; Trevisan, L.R.; Gomes, T.M..; Rossi, F. Effects of Irrigation with Treated Slaughterhouse Effluent and Bradyrhizobium spp. Inoculation on Soybean Development and Productivity: Strategies for Sustainable Management. *Agronomy* 2025, 15, 167. https://doi.org/10.3390/agronomy15010167

Distribuição hídrica e condutividade elétrica no bulbo úmido sob diferentes estratégias de irrigação em citros

Glaucia C Pavão [1], Regina CM Pires [2,] *, Claudinei F Souza [3] e Lais K Silveira [4]

[1] Doutora em Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agronômico de Campinas, Brasil; glauciapavao@gmail.com

[2] Pesquisadora Científica – Instituto Agronômico de Campinas, Brasil; regina.pires@sp.gov.br

[3] Professor Titular – Universidade Federal de São Carlos, Brasil; cfsouza@ufscar.br

[4] Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agronômico de Campinas, Brasil; laisksilveira@gmail.com

* Correspondence: rcmpires@gmail.com

Abstract: O manejo de irrigação eficiente é essencial para a produtividade dos pomares cítricos, otimizando o uso da água e reduzindo impactos ambientais. Este estudo analisou a formação e distribuição do bulbo úmido em diferentes estratégias de irrigação, através da umidade do solo e da condutividade elétrica (CE) em pomar de laranjeira Valência enxertada em citrumeleiro Swingle. O experimento ocorreu em um pomar comercial no sudoeste do estado de São Paulo, Brasil, em solo arenoso. Foram testados cinco tratamentos: 100% (T100), 75% (T75), 50% (T50) e 25% (T25) da evapotranspiração da cultura (ETc), além de um não irrigado (T0). A umidade e a CE foram monitoradas por Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), considerando variações climáticas e manejo hídrico. Os tratamentos T100 e T75 garantiram maior disponibilidade de água e melhor distribuição da umidade no bulbo. O T50 apresentou bulbo menor. O T25 teve menor uniformidade, indicando risco acentuado de estresse hídrico, enquanto o T0 confirmou a limitação da umidade sem irrigação. A CE acompanhou a umidade sem atingir níveis prejudiciais. Conclui-se que a irrigação deficitária pode ser uma estratégia viável para manejo sustentável da água em pomares cítricos.

Keywords: Irrigação eficiente; Umidade volumétrica do solo; Condutividade elétrica (CE); Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

1. Introdução

A citricultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil, com grande relevância econômica e social, especialmente no estado de São Paulo, que concentra a maior produção de laranjas do país [1]. Para garantir altos rendimentos e a qualidade dos frutos, o manejo adequado da irrigação tornou-se essencial, principalmente em regiões com distribuição irregular de chuvas [2]. Nesse contexto, a irrigação localizada, especialmente por gotejamento, tem sido amplamente

adotada por proporcionar maior eficiência no uso da água e permitir a fertirrigação, otimizando a absorção de água e de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação [3].

Dentre as estratégias de manejo da irrigação, a irrigação deficitária tem se destacado como uma alternativa sustentável para reduzir o consumo de água sem comprometer significativamente a produtividade [4]. Essa técnica consiste na aplicação de lâminas reduzidas de irrigação em relação à evapotranspiração da cultura (ETc), promovendo adaptações fisiológicas nas plantas que podem resultar em maior eficiência no uso da água [5]. No entanto, sua eficácia depende do conhecimento detalhado da umidade no solo, do clima e da resposta da planta ao déficit hídrico, o que pode ser monitorado por meio de técnicas eletromagnéticas, como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) [6].

O conhecimento sobre a dinâmica da água no solo é fundamental para um manejo racional da irrigação, sendo o bulbo úmido um dos principais elementos a serem monitorados. O bulbo úmido corresponde à região do solo onde a umidade se distribui a partir do ponto de aplicação da água, afetando diretamente o crescimento radicular, a absorção de nutrientes e o desenvolvimento da planta. Sua forma e extensão variam de acordo com a lâmina de irrigação aplicada, vazão do emissor, o tipo de solo e a taxa de infiltração, tornando essencial o monitoramento contínuo desse processo [7].

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo monitorar a formação e distribuição do bulbo úmido em diferentes estratégias de irrigação, analisando a umidade do solo e a condutividade elétrica (CE) em região ativa do radicular da laranjeira Valência enxertada em citrumeleiro Swingle.

2. Material e Métodos

Área experimental e delineamento

O experimento foi conduzido em um pomar comercial localizado no município de Iaras, no estado de São Paulo, Brasil (22º 48' 29" S, 49º 03' 37" O). A região tem altitude de 630 m e clima classificado como Cwa segundo Köppen, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos conforme Balanço Hídrico Climatológico (BHC) (Figura 1). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo de textura arenosa, apresentando mais de 80% de areia total e baixa capacidade de retenção hídrica (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição granulométrica, densidade do solo (d_{solo}), porosidade do solo (α_{total}), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e água disponível (AD), valores médios desde a superfície do solo até 0,7m de profundidade.

Composição Granulométrica			d_{solo}	α_{total}	θ_{CC}	θ_{PMP}	AD
Areia total	Silte	Argila					
%			(g cm^{-3})	(%)	m^3m^{-3}	m^3m^{-3}	mm
82,3	4,3	13,3	1,5	40	0,18	0,07	48,1

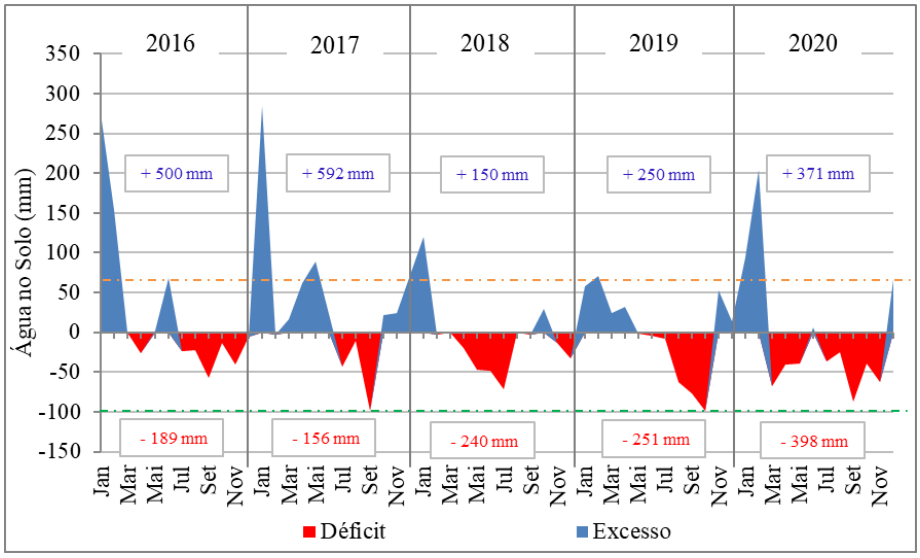


Figura 1 – Balanço Hídrico Climatológico com armazenamento de água no solo para capacidade de água disponível de 48mm, no município de Iaras-SP, Brasil para os anos de 2016 a 2020.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, com cinco tratamentos e seis repetições (Figura 2). Os tratamentos consistiram em diferentes lâminas de irrigação aplicadas por gotejamento: T100 – 100% da evapotranspiração da cultura (ETc); T75 – 75% da ETc; T50 – 50% da ETc; T25 – 25% da ETc; T0 – sem irrigação (sequeiro).

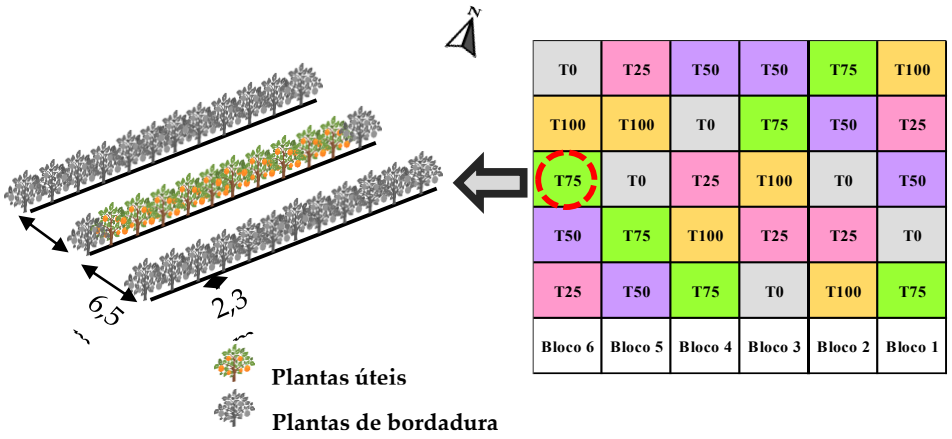


Figura 2 – Croqui da área experimental implementada e área útil das parcelas para avaliação de laranjeira Valência em citrumeleiro Swingle, com seis blocos e cinco tratamentos de diferentes lâminas de irrigação a 100, 75, 50, e 25 % da necessidade hídrica da cultura (T100, T75, T50 e T25, respectivamente) e sequeiro (T0) e detalhe da parcela, em Iaras, SP.

Fertirrigação e Adubação

A correção de acidez do solo, adubação e fertirrigação seguiram as recomendações de nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) para os solos brasileiros [8,9]. No tratamento não irrigado (T0), a adubação convencional com NPK foi parcelada em três períodos: outubro (40%), dezembro (30%) e março (30%) (Figura 3). Nos tratamentos irrigados, a fertilização foi distribuída em três fases: (i) agosto a outubro, (ii) novembro a janeiro e (iii) fevereiro a abril. A fertirrigação foi realizada semanalmente nos períodos (i) e (iii), enquanto no período (ii) houve aplicação sólida única de NPK para favorecer a reserva de nutrientes no solo durante a estação chuvosa.

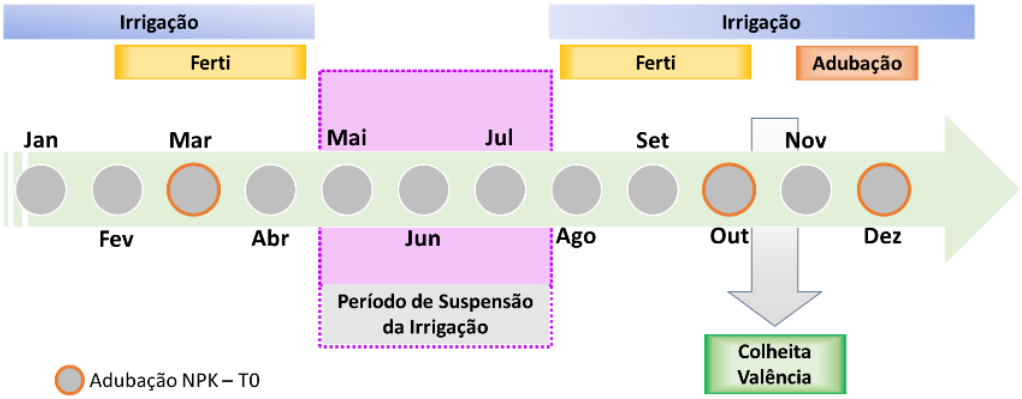


Figura 3- Calendário de irrigação, fertirrigações e adubação em cobertura nos tratamentos irrigados (T100, T75, T50 e T25) e de adubações do tratamento de sequeiro (T0).

Sistema de Irrigação e Monitoramento

A irrigação foi realizada por gotejamento, utilizando emissores autocompensantes com vazão de 2,3 L h^{-1}, espaçados a cada 0,5 m ao longo da linha de plantio. A lâmina de irrigação foi determinada com base na evapotranspiração de referência (ETo), calculada pelo método de Penman-Monteith, multiplicada pelo coeficiente de cultura (Kc), ajustado conforme o desenvolvimento fenológico das plantas [10].

O monitoramento da umidade do solo e da condutividade elétrica aparente (CE) foi realizado por meio de sondas de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) instaladas na região do bulbo úmido (Figura 4) para avaliar a dinâmica da umidade no solo e a distribuição dos sais. As sondas foram confeccionadas e calibradas em laboratório com solo da área do experimento para umidade volumétrica (θ) (equação 1) e para condutividade elétrica (CE) (equação 2).

$$\theta = 8E\text{-}06Ka^3 - 0{,}0009Ka^2 + 0{,}0376Ka - 0{,}1041 \qquad R^2 = 0{,}9971 \qquad (1)$$

$$CE_{\text{pasta saturada}} = 1{,}2274\,\theta + 2{,}0375\,CETDR + 0{,}395 \qquad R^2 = 0{,}9176 \qquad (2)$$

Para a instalação das sondas abriram-se trincheiras entre plantas e instalou-se 18 sondas formando uma malha para monitoramento na região do bulbo úmido até uma distância aproximada de 1,0 m do tronco da planta, conforme esquema apresentado na Figura 4A e Figura 4B em 2016 e 2017. Foram instaladas malhas de sondas em 15 trincheiras, três para cada tratamento. Utilizou-se o software Surfer®1, para desenhar os mapas através da krigagem de dados, para plotar as medidas do monitoramento da umidade, delineando os bulbos úmidos e para a distribuição da CE no perfil do solo.

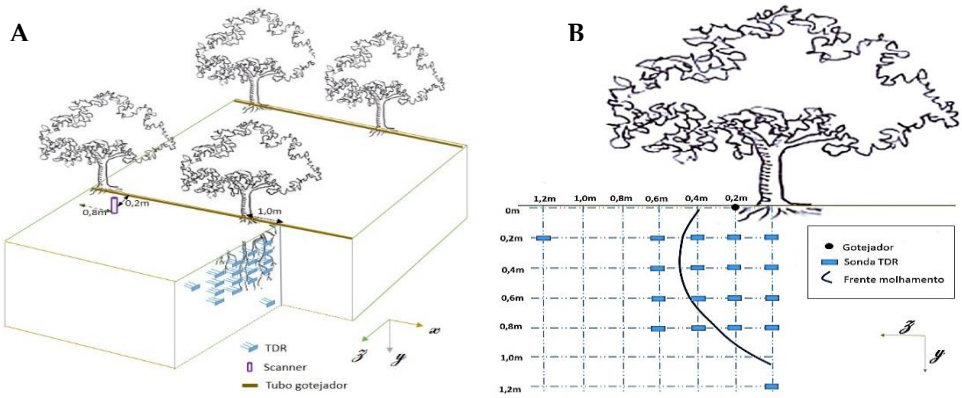
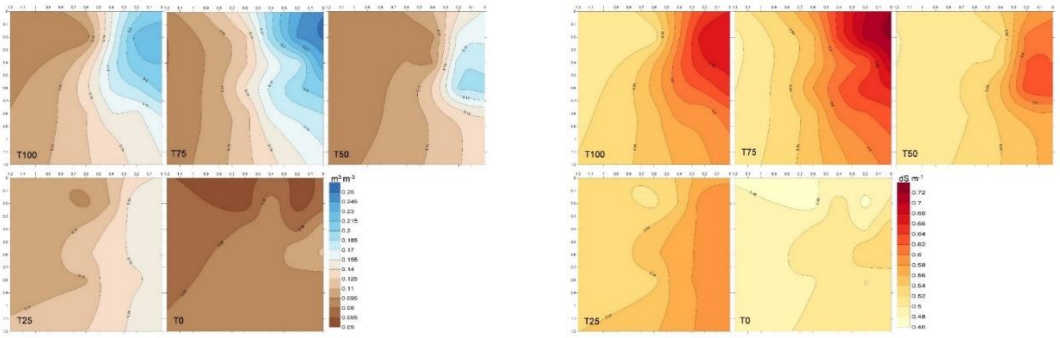


Figura 4 – Esquematização da instalação de sondas TDR em relação a linha de plantio (A); e posicionamento das sondas TDR no solo em profundidade e longitude da linha de plantio (B).

3. Resultados

Os monitoramentos de bulbo úmido e condutividade elétrica realizados com as sondas de TDR foram avaliados em três períodos distintos do manejo de irrigação de citros: sem chuvas e com as irrigações sendo realizadas diariamente (setembro/2017); com chuvas e irrigações complementares (março/2018); e sem chuva e sem irrigação – stress fisiológico par florescimento (maio/2018).

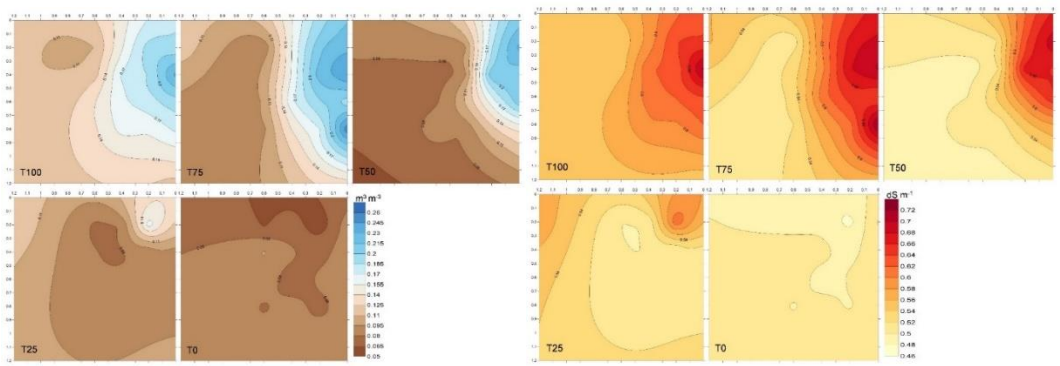
Em setembro de 2017, período em que as irrigações estavam sendo realizadas de forma sistemática, foi possível observar que os tratamentos T100 e T75 apresentaram bulbos úmidos bem definidos. No tratamento T50, o bulbo formado foi menor e mais concentrado entre 0,2 e 0,5 m de profundidade, o que pode estar associado à concentração de raízes nessa faixa. Já o tratamento T25 não apresentou um bulbo úmido delineado, embora tenha exibido valores de umidade superiores aos do tratamento T0 em todo o perfil analisado.



(a) (b)

Figura 5 – Distribuição da umidade do solo (m m^{-3}) (a) e condutividade elétrica (dS m^{-1}) (b) para T100, T75, T50, T25 e T0 em setembro de 2017.

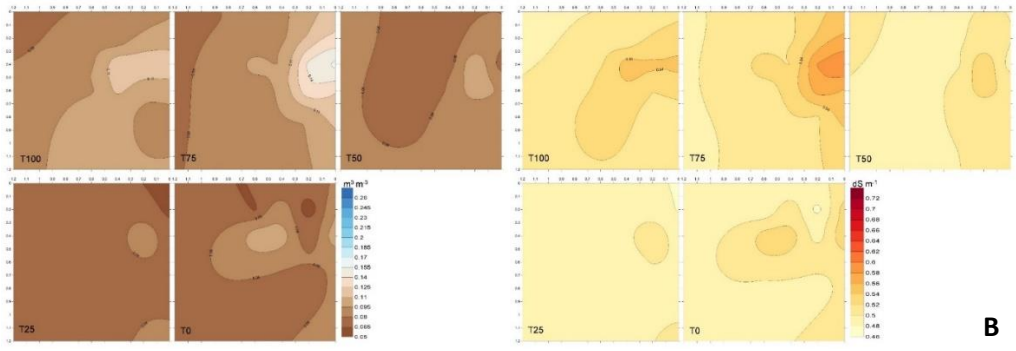
Em março de 2018, o monitoramento foi realizado durante o período de irrigação, e cinco dias antes da avaliação, houve uma chuva de 27 mm. O tratamento T75 apresentou um bulbo ligeiramente maior que o T100, sendo que ambos exibiram regiões úmidas bem definidas (Figura 6a). O T50 apresentou um bulbo maior em comparação à medição de setembro de 2017, também com boa delimitação. No T25, o bulbo foi observado até a profundidade de 0,3 m, com melhor definição em relação à avaliação anterior e posicionado próximo à planta. Por outro lado, o tratamento T0 apresentou um perfil de solo com menores valores de umidade. Nos tratamentos irrigados, a distribuição de sais seguiu o padrão observado nos bulbos de umidade, apresentando valores de CE superiores aos verificados no tratamento não irrigado (Figura 6b).



(a) (b)

Figura 6 – Distribuição da umidade do solo (m m^{-3}) (a) e condutividade elétrica (dS m^{-1}) (b) para T100, T75, T50, T25 e T0 em março de 2018.

Durante a suspensão da irrigação que antecedeu o florescimento dos citros e na ausência de chuvas, foi realizada uma avaliação no dia 8 de maio de 2018 (com a irrigação interrompida em 01/05). Observou-se que o perfil de umidade do solo em todos os tratamentos se apresentava com menores valores de umidade do solo (Figura 7a). Nos tratamentos T75 e T100, identificou-se uma área com umidade do solo ligeiramente acima dos demais. Apesar da redução geral da umidade em relação às análises anteriores, os maiores valores ainda foram registrados na região do bulbo, mantendo a tendência de distribuição observada na condutividade elétrica (CE) (Figura 7b). Esses resultados indicam que, mesmo após cerca de uma semana sem irrigação, houve uma diminuição acentuada da umidade do solo nos tratamentos que anteriormente recebiam irrigação.



(a) (b)

Figura 7 – Distribuição da umidade do solo (m m^{-3}) (a) e condutividade elétrica (dS m^{-1}) (b) para T100, T75, T50, T25 e T0 em maio de 2018

4. Discussão

Os tratamentos irrigados apresentaram bulbos úmidos bem definidos, sendo sua forma e alcance diretamente relacionados à lâmina de irrigação aplicada. No T100 e T75, a umidade distribuiu-se de maneira uniforme até profundidades de 0,6 m, garantindo maior disponibilidade hídrica na zona radicular. O tratamento T50 apresentou um bulbo menor, mas ainda com formato nítido e na região das raízes. No T25, a umidade ficou concentrada na camada superficial do solo (< 0,3 m), resultando em menor disponibilidade hídrica para as raízes. No T0 (sequeiro), a umidade do solo permaneceu baixa ao longo do experimento, confirmando a condição hídrica limitada no tratamento não irrigado. Esses resultados s a outros, que dão similares a outros e destacaram a influência da lâmina de irrigação na formação do bulbo úmido e na absorção de água pelas plantas cítricas [11;7].

A CE acompanhou a distribuição da umidade, sendo maior nas áreas próximas aos gotejadores nos tratamentos irrigados. Os valores máximos de CE foram observados no T100 e T75, indicando maior acúmulo de sais na região do bulbo úmido, mas sem atingir níveis críticos para as plantas cítricas (<1,4 dS m^{-1}) [3]. O T50 apresentou CE intermediária e equilibrada, enquanto no T25 houve maior variabilidade, sugerindo que a irrigação deficitária mais intensa pode resultar em maior concentração de sais em pontos específicos do solo. Resultados similares foram observados por Dias et al. (2014) [13], que indicaram a importância do monitoramento da CE para evitar riscos de salinização em pomares fertirrigados.

A irrigação deficitária moderada (T50) representa uma alternativa viável para otimizar o uso da água sem comprometer significativamente a disponibilidade hídrica na zona radicular e o crescimento e produtividade. Esse tratamento proporcionou um equilíbrio entre umidade do solo e CE na zona radicular, favorecendo a eficiência do sistema radicular na absorção de água e nutrientes. Conforme apontado por Ruiz-Sánchez et al. (2010) [5], a irrigação deficitária pode ser uma estratégia sustentável na citricultura, desde que manejada adequadamente para evitar impactos negativos na qualidade do solo e no crescimento das plantas.

5. Conclusões

Estratégias de irrigação deficitária podem ser utilizadas sem comprometer a umidade na zona radicular, sendo essenciais para manejo sustentável da água e manutenção da produtividade em pomares cítricos em regiões de restrições hídricas.

Contribuição dos autores: Conceitualização, metodologia, análise formal G.P, R.P. e C.S; investigação, G.P e L.S; redação — preparação do rascunho original, revisão e edição, G.P e R.P. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Agradecimentos: a CAPES e FUNDAG pelo apoio à pesquisa.

References

1. FUNDECITROS. Inventário de árvores do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro: retrato dos pomares em março de 2019 / Fundo de Defesa da Citricultura... [et al.]. – Araraquara-SP: Fundecitrus, 2019. 103 p. Disponível em: https://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/2019_05_24_Invent%C3%A1rio_e_Estimativa_do_Cinturao_Citricola_2019-2020.pdf.Author 1, A.; Author 2, B. Title of the chapter. In *Book Title*, 2nd ed.; Editor 1, A., Editor 2, B., Eds.; Publisher: Publisher Location, Country, 2007; Volume 3, pp. 154–196.
2. PIRES, R.C.M.; LUCHIARI, D.J.F.; ARRUDA, F.B.; MOSSAK, I. Irrigação. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. Citros. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, 2005. p. 369-408.
3. COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; MAGALHÃES, A.F.J; OLIVEIRA, A. S. Irrigação e fertirrigação na cultura de citros. In: SOUSA, V.F; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2011b. p.413-439
4. GRIZOTTO, R.K.; SILVA, J.A.A.; MIGUEL, F.B.; MODESTO, R.T.; VIERA JÚNIOR, J.B. Qualidade de frutos de laranjeira Valência cultivada sob sistema tecnificado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.16, p.784-789, 2012.
5. RUIZ-SANCHEZ, M.C.; DOMINGO, r.; CASTEL, J.R. Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. Spanish Journal of Agricultural Research, v.8, n.2, p.5 20, 2010.
6. SOUZA, C.F.; SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; COELHO, E.F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. Irriga. v.1 (edição especial), p.26-42, 2016.
7. SOUZA, C.F.; PIRES R.C.M.; MIRANDA, D.B.; VARALLO, A.C.T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. Irriga. v.18, p.597-606, 2013.
8. RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Instituto Agronômico (IAC), Campinas, 1996.
9. QUAGGIO, J.A.; MATTOS JUNIOR, D.; CANTARELLA, H. Manejo da fertilidade do solo na citricultura. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. Citros. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, 2005. p. 483-507.
10. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S., RAES; D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – gidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO. 1998. 300p. (Irrigation and Drainage, Paper 56)
11. COELHO FILHO, M.A.; BASSOI, L.H.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO, E.F.; PEREIRA, F.A.C. Relação solo-planta-atmosfera. In: SOUSA, V.F; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2011. p.27-90.
12. DIAS, N.S; GHEYI, H.R.; SOUSA NETO, O.N. Boas práticas na irrigação: manejo integrado da irrigação, o solo e aplicação de fertilizantes. In: LIMA, S.C.R.V.; SOUZA, F.; VALNIR JUNIOR, M.; FRIZZONE, J.A.; GHEYI, H. R. Technological innovations in irrigation engineering: impact on climate change, water quality and transfer of technology. Fortaleza: INOVAGRI, 2014. p. 57-75.

Fertirrigação no cultivo da beterraba utilizando água residuária da bovinocultura leiteira

Leonardo Duarte Batista da Silva[1], Paz Paulo Antonio[2]; Gabriel Ouverney de Freitas[3]; Roberta Cristina Farias de Oliveira Carvalho[4]; Raul Castro Carriello Rosa[5]; Marcos Filgueiras Jorge[6] e Vitória Machado Barbosa[4].

[1] Professor Titular da UFRRJ, Rio de Janeiro, Brasil; monitoreambiental@gmail.com

2 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ; pazagronomo@ufrrj.br

3 Graduando em Agronomia da UFRRJ; gabriel.storv@gmail.com

4 Granduanda em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ; roberta.carvalho@ufrrj.br, vic0808@ufrrj.br

5 Pesquisador da EMBRAPA Agrobiologia; raul.rosa@embrapa.br

6 Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ, filgueiras_jorge_marcos@hotmail.com

Resumo: A beterraba é uma cultura exigente em termos nutricionais, requer um manejo equilibrado de adubação que tenha a capacidade de repor os nutrientes que foram extraídos pela cultura, de modo a evitar o esgotamento do solo. O presente trabalho tem como objetivo analisar os aspectos agronômicos e sanitários na cultura da beterraba submetida à fertirrigação com água residuária da bovinocultura leiteira. O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), utilizou-se a água residuária da bovinocultura leiteira (ARB) tratada na Unidade Piloto de Tratamento (UPT) em sistema de *Wetland* Construído (WCs), foram selecionadas duas variedades de beterraba (*Beta Vulgaris L*.) vermelha e branca, as doses de ARB foram calculadas em função das doses de N (%), em que a referência utilizada (100% N) foi de 90 kg. ha^{-1} para as hortaliças. Os tratamentos aplicados foram: (0, 400, 800 e 1200 mL). Nas variáveis na massa fresca do bulbo (MFB) e no diâmetro do bulbo (DB), ocorreu diferença significativa quando submetidos ao teste t com ($p \leq 0,05$), mas não ocorreu diferença significativa entre as variáveis número de folhas (NF) e altura da planta (AP). Quanto aos aspectos sanitários, constatou-se ausência da Salmonella e uma quantidade de < 3 NMP.g^{-1} de E. Coli em todos os tratamentos. Conclui-se que a utilização da água residuária de bovinocultura de leite tratada apresenta potencial para ser utilizada na fertirrigação da cultura da beterraba, sendo que a cultura apresentou crescimento e desenvolvimento satisfatórios, em todos os tratamentos.

Palavras chave: biofertilizante; agricultura orgânica; manejo de irrigação

1. Introdução

O cultivo da beterraba *(Beta vulgaris* L) no Brasil é um dos mais importantes no mercado global de hortaliças agrícolas, representa 2,1 % do mercado nacional de hortaliças com a produtividade variando entre 20 e 35 t. ha^{-1}, o cultivo da beterraba em ambiente protegido no Brasil é uma atividade relativamente nova, mas vem crescendo rapidamente, especialmente nos estados do Sudeste e Sul do país [16], [20]. É uma cultura exigente em termos nutricionais, requer um manejo equilibrado de adubação que tenha a capacidade de repor os nutrientes que foram extraídos pela cultura, de modo a evitar o esgotamento do solo [18].

Para [3], o nitrogênio exerce grande efeito no crescimento das plantas e na qualidade dos produtos vegetais, e a beterraba é uma cultura bastante exigente em termos nutricionais. O aproveitamento das águas residuárias não consiste unicamente na disponibilização de água para irrigação, mas também para atender a demanda nutricional das culturas, sendo que esses efluentes podem ser ricos em elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, e proporcionará redução na compra de fertilizantes sintéticos [7]. De acordo com [10], a irrigação com água residuária pode economizar de 25-50% no uso de nitrogênio e fósforo nos campos e pode aumentar a produtividade das culturas.

Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento agronômico e aspectos sanitários da cultura da beterraba submetida a fertirrigação com água residuária da bovinocultura leiteira tratada em Wetland construído cultivado com capim Vetiver.

2. Materiais e Métodos

2.1. Descrição do experimento

Para a realização do trabalho usou-se água residuária da bovinocultura leiteira proveniente das atividades limpeza do pátio e da lavagem dos equipamentos de ordenha da instalação zootécnica do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), mais conhecido como Fazendinha Agroecológica do km 47, em Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. A Unidade Piloto Tratamento (UPT) é composta por: esterqueira; tanque séptico; filtro biológico de fluxo ascendente, dois Wetlands Construídos do modelo fluxo horizontal subsuperficial, ambos cultivados com o capim Vetiver. A UPT é composta por duas fases de tratamento, sendo primário e secundário.

Para a realização do experimento foram selecionadas duas variedades de Beterraba (*Beta Vulgaris* L.) a vermelha e a branca, quanto a fertirrigação, utilizou-se a água

residuária da Bovinocultura leiteira tratada na Unidade Piloto de Tratamento (UPT), localizada na cidade de Seropédica, estado do Rio de Janeiro (22° 48' 00" S, 43° 41' 00" W, altitude 33 m). O clima da região é classificado como Cwa segundo Köppen, com invernos moderadamente frios e quentes verões, com uma precipitação média anual de 1280 mm e uma temperatura média anual de 22,5 °C. O experimento foi realizado em vasos de 25L, em ambiente protegido, no período compreendido entre 17 de agosto a 17 de novembro de 2023. Os vasos foram preparados com brita, sombrite e com substrato (Organossolo).

As mudas utilizadas no experimento foram produzidas em bandejas de isopor no dia 24 de junho de 2023 em casa de vegetação no SIPA. O experimento foi conduzido em Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado (DIC), com 4 tratamentos e 6 reposições, foram 24 vasos para cada variedade que totalizou 48 plantas. No experimento, o nitrogênio N foi considerado como o nutriente de referência. A aplicação das diferentes doses de N recomendadas às culturas fornecidas por meio da fertirrigação, foram calculadas de acordo com [19], conforme a Equação 1.

Os tratamentos foram denominados como (T1, T2, T3 e T4), em que T1 (0%) corresponde o tratamento sem água residuária (1200 mL de água de abastecimento); T2 (33%) corresponde o tratamento com 33% de água residuária na mistura com água de abastecimento (800 mL de água de abastecimento + 400mL de ARB); T3 (66%) corresponde o tratamento com 66% de água residuária na mistura com água de abastecimento (400mL de água abastecimento +800mL de ARB); e T4 (100%) é o tratamento 100% de água residuária (1200 mL de ARB).

O início da aplicação dos tratamentos se deu após 7 dias do transplantio das mudas até o período da colheita, as mesmas eram aplicadas diariamente no período da manhã de forma manual com ajuda de um copo de medida de 500 mL. Após 90 dias do transplante (DAT), as beterrabas foram colhidas, nesse processo analisou-se variáveis como número de folhas (NF), altura da planta (AP), massa fresca do bulbo (MFB) e o diâmetro do bulbo (DB).

Todas as beterrabas foram pesadas em uma balança de precisão de 0,01 g, a altura das folhas por planta foi medida por intermédio de uma régua e quanto a medição do diâmetro, usou-se o paquímetro. Em seguida as amostras foram colocadas em sacos de papel Kraft mix de 2 kg e encaminhadas para o laboratório analítico de alimentos e bebidas LAAB/UFRRJ, onde realizou-se as análises microbiológicas de acordo com American Public Health Association [2]. Os dados foram submetidos a análise de variância ANOVA ($p \leq 0, 05$) de significância pelo teste de t. As Analises foram realizadas por intermédio do software Sisvar 5.6.

2.2. Equação para determinação da lâmina de Nitrogênio a ser aplicada por fertirrigação

$$TA_{AR} = 100\frac{[N_{abs} - (T_{m1}.\ MO.\ \rho.10^{7}.\ 0{,}05.\ \frac{n}{12})]}{[T_{m2}.\ N_{org} + (N_{amoniacal} + N_{nitrato})TR]}$$

em que: MO = conteúdo da matéria orgânica no solo, $kg.kg^{-1}$; ρ = massa especifica do solo, ton. m^{-3}; n = número de meses de cultivo da cultura; T_{m2} = taxa anual de mineralização do nitrogênio orgânico, $kg.kg^{-1}$; N_{org} = nitrogênio orgânico disponibilizado pelo resíduo aplicado, mg. L^{-1}; $N_{amoniacal}$ = nitrogênio amoniacal disponibilizado pelo resíduo aplicado, mg. L^{-1}; $N_{nitrato}$ = nitrogênio nítrico disponibilizado pelo resíduo aplicado, mg. L^{-1}; e TR = taxa de recuperação de nitrogênio mineral pela cultura, $kg.kg^{-1}$. ano^{-1}.

3. Resultados

3.1. Água residuária tratada (biofertilizante)

Os valores médios das análises físico-química de algumas características da água residuária de bovinocultura de leite tratada na UPT (biofertilizante) utilizada na fertirrigação da beterraba foram: demanda química de oxigênio (DQO) = 90,62 mg. L^{-1}; nitrito = 0,03 mg. L^{-1}; nitrato = 0,88 mg. L^{-1}; nitrogênio total = 67,8 mg. L^{-1}; amônia = 25,2 mg. L^{-1}; fóforo = 2,1 mg. L^{-1} ; pH = 7,53; e condutividade elétrica = 886,1 $\mu S.cm^{-1}$.

3.2. Desenvolvimento agronômico da beterraba

Na Tabela 1, são apresentados os valores médios das variáveis analisadas: (MFB = massa fresca do bulbo; NF= número de folhas; DB = diâmetro do bulbo; e AP= altura da planta), para os quatro tratamentos, para as variedades de beterraba analisadas (vermelha e branca). É possível verificar que ocorreu diferença significativa na variável MFB no T2 e T3, a mesma diferença significativa ocorreu no DB no T2 e T1, quanto as Variáveis NF e AP não ocorreu diferença significativa. A despeito de não haver diferenças significativas das variáveis NF e AP, pode-se notar que elas apresentaram melhor desempenho quando submetidas aos tratamentos T1 e T4.

3.3. Análise microbiológica

Os indicadores microbiológicos E. Coli e Salmonella são considerados referência mundial para alimentos e efluentes. No presente estudo foram observadas a presença de < 3 NMP. g^{-1} de E. Coli; e a ausência de Salmonella em todos os tratamentos. –Resultado da análise sanitária para identificação da presença de E. Coli e Salmonella na cultura de beterraba (vermelha e branca) submetida ao processo de fertirrigação com água residuária da bovinocultura tratada, submetida ao processo de fertirrigação com água residuária da bovinocultura tratada para os quatros tratamentos, atendemas legislaçõe vigentes da vigilância sanitária.

3.4. Valores médios de massa fresca do bulbo; número de folhas; diâmetro do bulbo; e altura da planta, para os quatro tratamentos, para as beterraba vermelha e branca

Tabela 1- Valores médios das variáveis analisadas: (MFB = massa fresca do bulbo; NF= número de folhas; DB = diâmetro do bulbo; e AP= altura da planta), para os quatro tratamentos, para as variedades de beterraba analisadas (vermelha e branca).

		Média das variáveis			
Variedades	Tratamentos	MFB (g.planta^{-1})	NF (folhas)	DB (cm)	AP (cm)
	T1	314ABa	11,3Aa	82,1ABa	41,8Ab
Vermelha	T2	464Bb	10,0 Aa	92,6Bb	34,2Aa
	T3	214Ba	7,7 Aa	68,6Aa	35,6Aa
	T4	364ABa	10,7 Aa	86,4ABb	41,2Ab
	T1	247Aa	13,8 Aa	78,8Ba	28,3Aa
Branca	T2	174 Aa	13,5 Aa	62,5ABa	31,3Aa
	T3	220 Aa	10,7 Aa	73,2ABa	26,0Aa
	T4	248 Aa	11,2 Aa	51,3Aa	35,3Aa
CV (%)		51,07	48,55	27,51	32,95

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si na mesma variedade e diferentes doses, medias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre si na mesma dose diferente variedade pelo teste t ($p < 0,05$).

4. Discussão

4.1. Desenvolvimento agronômico da beterraba

De acordo com [26], a incorporação de fontes orgânicas como a água residuária tratada contribui para o desenvolvimento da cultura fertirrigada. No trabalho realizado por [9] sobre a cultura da beterraba, verifica-se que as características agronômicas da cultura analisadas, não foi verificadas diferenças significativas entre os tratamentos quanto, a 5% de probabilidade quando essas submetidas ao teste de Tukey.

4.1.1. Massa fresca do bulbo (MFB)

Conforme com os resultados da (MFB) exposto na Tabela 1, é possível constatar que existe diferenciação significativa no nível de 5% por efeito das doses, entre os tratamentos, os resultados da massa fresca do bulbo da beterraba apresentaram diferença significativa entre si pelo teste de t a 5%. A maior média de 364 g.planta^{-1} para a beterraba roxa e 248 g.planta^{-1} para variedade branca. O resultado do presente trabalho corrobora com o trabalho realizado por [14] sobre a fertirrigação da alface com água residuária da bovinocultura leiteira tratada em uma UPT (a mesma desse trabalho), onde constatou-se que a aplicação da dose maior resultou em maior produção de massa fresca.

Quanto ao trabalho realizado por [8] sobre uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias da bovinocultura para produção de rúcula, ocorreu variação significativa nos valores médios relacionados com o número de massa fresca, sendo que T1 foi superior a T2 e T3. De acordo com o trabalho realizado por [1], onde objetivou avaliar diferentes manejos de adubação nos aspectos quantitativos e qualitativos na cultura da beterraba, os valores obtidos da massa seca do bulbo foram menores em relação aos valores do presente trabalho.

Portanto, é possível notar o potencial das hortaliças e frutíferas quando fertirrigadas com os efluentes tratados. Para [22], a utilização de águas residuárias tratadas na agricultura irrigada pode fornecer nutrientes essenciais para o desenvolvimento agronômico das plantas, possibilitando dessa forma, a substituição total ou parcial dos fertilizantes químicos.

4.1.2. Número de folhas (NF)

De acordo com [29], o aumento no número de folhas em uma espécie contribui para o aumento da taxa fotossintética, favorecendo seu desenvolvimento. Os resultados logrados pelo mesmo autor acima citado no que diz respeito a produção de rabanete com água residuária tratada, apresentou resultado significativo que corrobora com o número de folhas do atual trabalho.

Para os valores médios do (NF) não ocorreu diferença entre os tratamentos. Os valores obtidos por [28], na fertirrigação do rabanete, corroboram com os resultados obtidos neste trabalho, onde não foi observada diferença significativa para o número de folhas para os tratamentos que receberam A1, A2 e A3 com níveis de 0, 30, 60, 90% de N respectivamente.

Importa ressaltar que maiores médias em relação ao número de folhas do presente trabalho, foram observadas nos tratamentos T1 das variedades vermelha e branca,

onde não receberam água residuária. [16] constatou que ocorreu diferença significativa quanto ao número de folhas na beterraba quando realizou trabalho sobre reuso de água residuária tratada no cultivo de hortaliças.

No trabalho realizado por [30] avaliou-se crescimento e produção de pimentão utilizando água residuária doméstica tratada, constatou-se que o maior número de folhas foi obtido com concentrações de esgoto doméstico tratado, promoveram incremento linear no NF do pimentão, chegando a atingir o número máximo de folhas (41 folhas) na concentração de 100% do efluente.

De acordo com [11] ao avaliarem várias lâminas de água residuária na irrigação, observou-se tal como os compostos nitrogenados, os outros compostos presentes na água residuária podem proporcionar melhor desempenho quanto ao número de folhas. Ainda, os mesmos autores constataram que, assim como as doses de nitrogênio, as lâminas de irrigação não influenciaram significativamente no número de folhas por planta e as maiores médias de número de folhas por planta com valor de aproximadamente 25 folhas, foram obtidas com o uso de água de esgoto.

4.1.3. Altura da planta (AP)

O nitrogênio contribui para o aumento da produtividade das culturas por promover maior desenvolvimento da planta. Com os resultados das médias expostas na Tabela 1, a maior média da variedade vermelha não foi com a fertirrigação, já na variedade branca a fertirrigação influenciou na altura da planta com o tratamento T4 sendo a maior média.

No Trabalho realizado por [25] que utilizaram água residuária para fertirrigação da cebolinha, constatou-se que as plantas que receberam 100% de água residuária apresentaram maior altura dentre os demais tratamentos. Conforme [15], as águas residuárias são fontes alternativas viáveis para suprir as necessidades hídricas e, em grande parte, nutricionais por conter macro e micronutrientes essenciais para as plantas.

4.1.4. Diâmetro do bulbo (DB)

Segundo o trabalho realizado por [3] que objetivou avaliar a produtividade e qualidade da beterraba em função da aplicação de doses de nitrogênio no sistema convencional não ocorreu influência das doses de nitrogênio para o peso médio das raízes de beterraba não foi significativa para dose. No presente trabalho ocorreu diferença significativa nas variedades, onde a média da beterraba vermelha foi observado no T2 e na beterraba branca foi no T1, nos demais tratamentos não ocorreu diferença significativa.

Segundo [13], que avaliaram o crescimento e fitomassa de batata-doce irrigada com água residuária tratada averiguou-se que os valores médios do diâmetro da batata não sofreram efeito significativo ($p < 0,01$; $p < 0,05$) pelo teste F. Os autores acima citados, recomendam o uso da água residuária no cultivo da batata-doce, pois não influencia nas características agronômicas da cultura.

De acordo com [19], afirma que uma das vantagens óbvias da fertirrigação é a possibilidade de se subdividir a adubação ao longo do ciclo da cultura visando otimizar a utilização dos nutrientes pelas espécies agrícolas ao disponibilizá-los no momento mais adequado em comparação à adubação convencional, a fertirrigação permite ajustes finos de acordo com as fases de desenvolvimento das plantas.

3.2. Análise microbiológica

A análise microbiológica é utilizada para determinar o risco que um determinado alimento pode representar para a saúde dos consumidores, para poder identificar os organismos presentes [24]. Os resultados obtidos foram comparados com os padrões legais sobre aspectos sanitários de acordo com a Instrução Normativa- IN° 161, de julho de 2022 estabelecidos pela ANVISA. Sendo assim, foi possível constatar que os tratamentos (T1, T2, T3 e T4), não apresentou nenhuma interferência microbiológica na beterraba. De acordo com [5], a menção de contagem < 3 $NMP.g^{-1}$ para a metodologia convencional, indica que os tubos inoculados não apresentam resultados positivos que possam influenciar na contaminação do produto, podendo afirmar que não há presença de coliformes fecais por g de produto.

A presença de um microrganismo patogênico não necessariamente implica na transmissão de doenças, mas pode ser considerado como um risco, na verdade, o risco real para que uma pessoa possa ser contaminada depende várias fatores como resistência dos microrganismos ao longo do tratamento do efluente, condições ambientais do local em que se localiza a unidade de tratamento, a quantidade da dose infectante e a patogenicidade dos agentes infecciosos e o grau de exposição humana com os agentes de transmissão [5].

Os resultados obtidos no presente estudo corroboram com as observações realizadas por [13], quando os autores constataram a ausência de Salmonella e para E. Coli o valor foi de < 3 $NMP.g^{-1}$ em todas as amostras analisadas de cenoura submetida ao processo de fertirrigação com água residuária da bovinocultura leiteira tratada em uma UPT. Os mesmos autores alegam que o produto apresentou qualidades sanitárias suficientes para o consumo humano e o aproveitamento dos efluentes pode contribuir na redução de riscos ambientais e nos gastos com a compra de fertilizantes.

Quanto ao estudo realizado por [9], não foi constatada a presença de Salmonella e o valor da E. Coli foi de < 3 NMP.g^{-1} no cultivo de beterraba e cenoura fertirrigados com água residuária doméstica tratada e de acordo com os autores, os produtos não apresentaram nenhum risco de saúde para o ser humano, pois estavam de acordo com a legislação da ANVISA.

De acordo com [18], as características do efluente final demonstram que após o tratamento pode haver decaimento dos microrganismos, é importante realçar a eficiência no funcionamento de todas etapas de tratamento. No estudo realizado por [24], no cultivo de couve manteiga irrigada com água residuária, os resultados obtidos de coliformes totais (NMP.g^{-1}) e de Salmonella nas concentrações: T1(100% água da concessionária), T2 (50% água da concessionária + 50% água residuária), T3(100% água residuária), são semelhantes aos resultados obtidos no presente trabalho.

O resultado do presente trabalho foi obtido por [29], quando usou água residuária do esgoto doméstico tratado com biocarvão de bagaço de laranja para fertirrigar a cultura da alface. Para [12], a qualidade do efluente é uma questão relevante, pois a baixa qualidade do efluente, pode favorecer a introdução de microrganismos patogênicos em produtos durante a pré e pós-colheita, sobretudo hortaliças, plantas que emitem ramas rastejantes ou os frutos se desenvolvam próximo ao solo.

5. Conclusão

De acordo com os resultados analisados, pode-se concluir que a utilização da água residuária de bovinocultura de leite tratada apresenta potencial para ser utilizada na fertirrigação da cultura da beterraba, sendo que a cultura apresentou crescimento e desenvolvimento satisfatórios em todos os tratamentos.

Referências

1. AGUIAR, F. R.; FRANÇA, A. C; CRUZ, R. de S; SARDINHA, L. T; MACHADO, C. M. M.; FERREIRA, B. de O; ARAÚJO, F. H. V. Produção e qualidade de beterrabas submetidas a diferentes manejos de adubação e efeito residual na produção de milho cultivado em sucessão. Journal of Environmental Analysis and Progress, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 060–070, 2021.
2. APHA (2015). Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. 21st Edition, American Public Health Association.
3. BARRETO, C. R; ZANUZO, M. R; WOBETO, C; DA ROSA, C. C. B. Produtividade e qualidade da beterraba em função da aplicação de doses e nitrogênio. Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 16, n. 1, p. 145-158, 2013. https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2013.v16i1.52
4. CARRERAS-SEMPERE, M; CACERES, R; VIÑAS, M; BIEL, C. Use of recovered struvite and ammonium nitrate in fertigation in tomato (Lycopersicum esculentum) production for boosting circular and sustainable horticulture. Agriculture, v. 11, n. 11, p. 1063, 2021. https://doi.org/10.3390/agriculture11111063
5. CARVALHO, R. S. D; SANTOS FILHO, J. S. D; SANTANA, L. O. G. D; GOMES, D. A; MENDONÇA, L. C; FACCIOLI, G. G. Influência do reuso de águas residuárias na qualidade microbiológica do

girassol destinado à alimentação animal. Revista Ambiente & Água, v. 8, p. 157-167, 2013. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1116

6. CECLU, L; NISTOR, O. Red beetroot: Composition and health effects - A review. J. Nutr. Med. Diet Care, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2020. https://doi.org/10.23937/2572-3278.1510043
7. COVA, A. M. W; SANTOS, A. L; SOUZA, M. G; SILVA, L. L; NETO, A. D. A; GHEYI, H. R. Água residuária como fonte de recurso hídrico e nutrientes no cultivo de girassol ornamental. Revista Geama, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 61–66, 2021.
8. DAGNAISSER, L. S. Uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias da bovinocultura para produção de rúcula (Eruca vesicaria (L.). Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.
9. DANTAS, I. L. A. Análise microbiológica de cenoura e beterraba irrigadas com águas residuárias domésticas tratadas. Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Sergipe, 2015.
10. DEB, S; DUTTA, P. Wastewater in Agriculture: Possibilities and Limitations. Adaptive Soil Management: From Theory to Practices, p. 215-225, 2017.
11. FREITAS, G; OLIVEIRA, L. C; RIBEIRO, M. L; GALLO, Z. Fertirrigação com vinhaça no município de São Roque do Canaã-ES. Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 13, n. 1, p. 158-165, 2010. https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2010.v13i1.135
12. JESUS, F. L. F; SANTOS, O. N. A; TALAMINI JUNIOR, M. V.; GOMES, T. M.; ROSSI, F.; SÁNCHEZ ROMÁN, R. M. Águas residuárias para irrigação no brasil: uma abordagem química, física e microbiológica. IRRIGA, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 562–589, 2020. https://doi.org/10.15809/irriga.2020v25n3p562-589.
13. JORGE, M. F. et al. Potential use of treated wastewater from a cattle operation in the fertigation of organic carrots. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), [s. l.], v. 57, n. 4, p. 542–554, 2022. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/1385. Acesso em: 28 jun. 2024.
14. JORGE, M. F. Tratamento e disposição final de águas residuárias de bovinocultura em solos sob manejo orgânico de produção de olerícolas. 2018. 179 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2018.
15. MAGALHÃES, A. G; MARTINS, E. L; MEDEIROS, S. S. Análise do crescimento de Mimosa caesalpiniaefolia Benth. irrigada com água residuária em região semiárida / Growth analysis of mimosa caesalpiniaefolia Benth. irrigated with wastewater in semiarid region. Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 5, n. 12, p. 28334–28342, 2019. https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-019.
16. MARCUZZO, L. L; HARBS, S. C; KOTKOSKI, B; PAULAKOSKI, A. C. Análise da relação entre incidência e severidade foliar da cercosporiose da beterraba. Global science and technology, p. 29-33, 2021.
17. MARQUES, L. F; MEDEIROS, D. C; COUTINHO, O. L. Produção e qualidade da beterraba em função da adubação com esterco bovino. Rev. Bras. de Agroecologia, v. 5, n. 1, p. 24-31, 2010.
18. MARQUES, M. S; SILVA, A. A. F; GABRIEL FILHO, L. R. A; PUTTI, F. F.; GÓES, B. C Análise bibliométrica sobre o uso de águas residuais na agricultura. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, [S. l.], v. 3, pág. e30311326105, 2022. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26105.
19. MATOS, A.T. Disposição de águas residuárias no solo. Viçosa, MG: AEAGRI, 2006. 142p. (Caderno Didático n. 38).
20. MIRANDA, J. R.; PEREIRA, G. M. CULTIVO DA BETERRABA SOB DIFERENTES TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO. IRRIGA, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 220–235, 2019. https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p220-235.
21. MITREVSKI, J; PANTELIĆ, N. Đ; DODEVSKA, M. S; KOJIĆ, J. S; VULIĆ, J. J; ZLATANOVIĆ, S; ANTIĆ, V. V. Effect of beetroot powder incorporation on functional properties and shelf life of biscuits. Foods, v. 12, n. 2, p. 322, 2023. doi.org/10.3390/foods12020322
22. NASCIMENTO, J. S; SOUZA, T. A; FIDELES FILHO, J; BEIRIGO, R. M. Avaliação do crescimento, desenvolvimento e produção do algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. Agropecuária Científica no Semiárido, Patos, v. 14, n. 4, p. 331-338, 2018. https://doi.org/10.30969/acsa.v14i4.1052
23. OLIVEIRA, R. C; SILVA, P. F; MOREIRA, M, R; DANTAS, N, J; SABOYA, L. M. F; FARIAS, M. S. S. Crescimento e fitomassa de batata-doce irrigada com água residuária tratada. IRRIGA, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 97–109, 2021. https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n1p97-109

24. RAMOS, F. S. M. Características agronômicas e microbiológicas da couve manteiga (Brassica Oleracea L.) irrigada com água residuária tratada em ambiente protegido. Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Sergipe, 2021.
25. SALES, Mariana AL; SÁNCHEZ-ROMÁN, Rodrigo Máximo. Utilização da água residuária tratada por radiação solar na irrigação da cultura de cebolinha. Irriga, v. 24, n. 3, p. 645-661, 2019. https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p645-661.
26. SANTOS, R. D. S. Reúso de água residuária tratada no cultivo de hortaliças. Tese (doutorado)- Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucato, 2019.
27. SENTKOWSKA, A; PYRZYŃSKA. Old-Fashioned, but Still a Superfood—Red Beets as a Rich Source of Bioactive Compounds. Applied Sciences, v. 13, n. 13, p. 7445, 2023. https://doi.org/10.3390/app13137445
28. SILVA, P; MATOS, R; DANTAS JÚNIOR, G. J; ALENCAR, A. E; DANTAS NETO, J. Índice de colheita e partição de assimilados do rabanete sob fertirrigação nitrogenada. ENCICLOPEDIA BIOSFERA, [S. l.], v. 11, n. 21, 2015.
29. SOUZA, A. M. SA. Fertirrigação da alface com esgoto doméstico tratado com biocarvão de bagaço de laranja. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, MG. 2022.
30. TAVARES, F. B; SILVA, A. C. R; SANTOS F, C; FREITAS MOURA, K. K. C. Crescimento e produção de pimentão utilizando água residuária doméstica tratada. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 13, n. 5, p. 3683, 2019. https://doi.org/ 10.7127/rbai.v13n5001131

Fertirrigação de Rabanete com Biofertilizante Produzido na Unidade Piloto de Tratamento de Água Residuária de Bovinocultura de Leite

Leonardo Duarte Batista da Silva[1], Assamo Fernando Massache[2]; Marcos Filgueiras Jorge[3]; Wesley da Silva Brito[4]; Ednaldo da Silva Araújo[5]; José Guilherme Marinho Guerra[5], Raul Castro Carielo Rosa[5]; Emily Tiba Ferreira[4] Paz Paulo Antonio[2].

[1] Professor Titular da UFRRJ, Rio de Janeiro, Brasil; monitoreambiental@gmail.com

[2] Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ; assamoassamo@gmail.com, pazagronomo@ufrrj.br

[3] Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ, filgueiras_jorge_marcos@hotmail.com

[4] Granduando em Engenharia Agrícola e Ambiental da UFRRJ; wes.agriamb@gmail.com, emilytibaferreira@gmail.com

[5] Pesquisador da EMBRAPA Agrobiologia; ednaldo.araujo@embrapa.br, raul.rosa@embrapa.br, guilherme.guerra@embrapa.br

Resumo: A bovinocultura leiteira em confinamento visa elevar a eficiência produtiva, mas enfrenta desafios ambientais significativos no manejo dos resíduos gerados, ricos em nutrientes e material orgânico, com potencial poluente. Nesse sentido, os Sistemas de Alagados Construídos (SAC) são uma solução economicamente viável para tratar efluentes, incluindo Água Residuária da Bovinocultura (ARB), sendo valorizados por suas características estéticas e ambientais. Destarte, esta pesquisa buscou avaliar o desempenho agronômico do rabanete cultivado em vasos com substrato proveniente da compostagem termofílica, fertilizados com ARB. O experimento foi conduzido no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA) em Seropédica-RJ. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com doses de ARB representando 0%, 100%, 200% e 300% da necessidade de nitrogênio das culturas. Os resultados demonstraram que as diferentes doses de ARB não resultaram em diferenças estatisticamente significativas na maioria dos parâmetros fitotécnicos do rabanete. Contudo, a dose de 200% de ARB proporcionou maiores valores médios para várias variáveis, e volumes maiores de ARB mostraram-se promissores para alguns aspectos específicos das plantas, como o número de folhas e comprimento de raízes. A pesquisa sugere que o uso cuidadoso de ARB pode maximizar os benefícios no cultivo de rabanetes, destacando a necessidade de um manejo equilibrado do uso de ARB.

Palavras-chave: tratamento de efluentes 1; reúso da água 2, fertilizantes 3

1. Introdução

O uso do solo para tratar águas residuais provenientes de atividades agroindustriais e domésticas é uma abordagem atrativa, especialmente em ambientes tropicais e em regiões com espaço disponível, como é o caso do Brasil. Essa prática fundamenta-se na habilidade do sistema solo-planta em depurar as águas, empregando mecanismos físicos, químicos e biológicos para remover os poluentes presentes nos efluentes [9]. Além disso, os efluentes orgânicos oriundos de sistemas de produção leiteira confinada, quando lançados num corpo receptor, provocam alterações físicas e químicas nos mananciais, oferecem riscos à saúde pública e ao abastecimento, porque podem imtroduzir na água potável elementos patogênicos e/ou tóxicos [25].

A agricultura orgânica tem demonstrado ao longo do tempo um impacto positivo no meio ambiente, promovendo a reciclagem de nutrientes, permitindo que a fertilidade do sistema solo-planta seja mantida exclusivamente por matéria orgânica, reduzindo a quantidade de fertilizantes sintéticos que entram no sistema agrícola. Embora o mercado de produtos orgânicos esteja crescendo, local e globalmente, e a demanda aumente nos próximos anos, o custo associado à produção de nutrientes de alta qualidade a partir de resíduos orgânicos ainda apresenta custos elevados [17], [19].

As práticas agroecológicas melhoram os serviços ecossistêmicos, em áreas de horticultura, o que é extremamente relevante para o aprimoramento da agroecologia no contexto atual e estão alinhadas com os “Objetivos do Desenvolvimento Sustentável” (ODS), previstos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas [21], na busca por sistemas produtivos sustentáveis.

A utilização de águas residuais para fins agrícolas é uma realidade atual e futura. Mais de um terço das hortaliças e um quarto das colheitas de cereais produzidas no mundo usam águas residuais [8]. Ante ao exposto, utilizar a água residuária de bovinocultura (ARB) como fertilizante via fertirrigação representa uma alternativa para o fornecimento de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. A ARB é o subproduto líquido das atividades da produção leiteira, originado dos procedimentos diários de limpeza dos currais de confinamento. Na sua composição há predominantemente excrementos e urina dos animais, restos de leite, detergente e um volume significativo de água proveniente da higienização de currais [12].

O uso da ARB na fertilização de plantas é crucial por várias razões. Além de proporcionar nutrientes essenciais às culturas, há a possibilidade de redução da

poluição hídrica ao reaproveitar os resíduos da bovinocultura. A ARB possui potencial para a complementação ou substituição da adubação nitrogenada convencional, sendo uma alternativa econômica, circular e sustentável [5]. Ademais, a sua aplicação em sistemas de produção agroecológica tem demonstrado eficiência para diferentes culturas [12], [14], [26].

Destarte, o presente trabalho consistiu em avaliar o desempenho agronômico do rabanete cultivado em vasos com substrato proveniente da compostagem termofílica fertilizadas com água residuária da bovinocultura leiteira.

2. Materiais e Métodos

2.1. Água residuária de bovinocultura de leite (ARB)

A água residuária, utilizada no experimento foi coletada no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), mais conhecido como Fazendinha Agroecológica do km 47. É uma área de ensino, pesquisa e capacitação em agroecologia, situada no município de Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. O clima da região é quente e úmido. A temperatura média do mês mais frio é superior a 20 ºC e a temperatura máxima no verão pode ultrapassar os 40 ºC. A precipitação anual é de 1.300 mm [14]. A água residuária de bovinocultura de leite (ARB) utilizada nesta pesquisa foi obtida da lavagem do curral do SIPA.

2.2. Caracterização físico-química da água residuária de bovinocultura

A caracterização da ARB foi obtida a partir das análises de Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK= Amônia + Nitrogênio orgânico), Nitrogênio amoniacal, Nitrato, Nitrito, Potássio, Fósforo total, Alcalinidade, Coliformes Termotolerantes (log) NMP.100mL^{-1}, *Salmonella sp.* As análises do parâmetro DQO foram obtidas pelo método colorimétrico do teste Spectro Kit DQO Efluentes da Alfakit. A unidade piloto de tratamento da ARB é constituídapor uma estação piloto composta por: esterqueira, tanque séptico, filtro biológico de fluxo ascendente, filtro biológico de fluxo descendente, Sistema de Alagado Construído (SAC) de fluxo horizontal, conjunto para aquecimento solar e canteiros para olerícolas, conforme descrito por [14].

As análises das águas residuárias foram realizadas no Laboratório de Monitoramento Ambiental I - Águas e Efluentes, do Departamento de Engenharia da Universidade Federal Rural do estado do Rio de Janeiro. As análises químicas e microbiológicas de ARB foram realizadas conforme métodos recomendados por [1] e[4] e preparados sempre pelo menos 48 horas antes da utilização.

2.3. Descrição do experimento

Os experimentos de produção de rabanete (*Raphanus sativus* L.) foram conduzidos em vasos de 25 L contendo o substrato Organossolo proveniente da compostagem termofílica de poda de árvores; resíduos de refeitórios, cervejarias, fábricas de sucos e refrigerantes, fábrica de pães, bolos e massas; frutas, legumes e verduras, borra de café, fibra de coco, lodo tratado e cama de equino [22].

Cada vaso recebeu três plantas, as quais representarão uma unidade experimental por meio da média obtida em cada parâmetro a ser analisado. A fertirrigação nas culturas foi feita manualmente.

O experimento de rabanete foi colhido aos 40 dias após o transplante (DAT) das mudas. Quanto aos parâmetros fitotécnicos, estes foram avaliados para a cultura do rabanete: massas frescas da parte aérea e bulbo, massas secas da parte aérea e bulbo, diâmetro do bulbo, número de folhas e altura da planta.

A determinação da massa fresca da parte aérea foi realizada logo após a colheita, quantificada por meio de balança analítica eletrônica (0,001 g) sendo três plantas por repetição. As massas secas da parte aérea foram obtidas por meio da secagem da parte aérea das plantas em estufa de circulação forçada de ar, mantida a aproximadamente 65 ºC até à estabilização da biomassa seca e quantificada com balança analítica eletrônica (0,001 g).

Com relação às exigências nutricionais da cultura, a fertilização foi baseada em suas demandas por nitrogênio. Foram necessários, para se obter uma produção eficiente, 20 kg de N ha^{-1} (Freire, 2013). Foram feitas análises químicas do substrato Organossolo e da ARB, para que fossem calculadam às doses de ARB aplicadas em ambas as culturas, por meio da Equação 1, proposta por [18].

A semeadura do rabanete com taxa de germinação de 93%, foi semeada em bandeja de isopor contendo substrato composto por 83% de húmus, 15% de carvão vegetal e 2% de torta de mamona. A produção do rabanete foi realizada numa casa de vegetação com 60m^2. O primeiro ciclo do rabanete foi cultivado entre os meses de julho e agosto de 2023 e o segundo ciclo entre os meses de março e abril de 2024.

O delineamento experimental adotado em ambos os experimentos foi inteiramente casualizado (DIC), compostos por doses de ARB que representaram T1-0%, T2-100%, T3-200% e T4-300% da necessidade de nitrogênio que as culturas demandaram. Após a obtenção dos dados, os mesmos foram submetidos aos testes de normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias. E em seguida realizaram-

se as análises de variâncias pelo teste F e quando significativos, foram realizados os testes de Scott-Knott e 5% de probabilidade.

2.4. Equação para determinação da lâmina de Nitrogênio a ser aplicada por fertirrigação

$$TA_{AR} = 100\frac{[N_{abs} - (T_{m1}.\ MO.\ \rho.10^7.\ 0{,}05.\ \frac{n}{12})]}{[T_{m2}.\ N_{org} + (N_{amoniacal} + N_{nitrato})TR]}$$

em que: MO = conteúdo da matéria orgânica no solo, $kg.kg^{-1}$; ρ = massa especifica do solo, ton. m^{-3}; n = número de meses de cultivo da cultura; T_{m2} = taxa anual de mineralização do nitrogênio orgânico, $kg.kg^{-1}$; N_{org} = nitrogênio orgânico disponibilizado pelo resíduo aplicado, mg. L^{-1}; $N_{amoniacal}$ = nitrogênio amoniacal disponibilizado pelo resíduo aplicado, mg. L^{-1}; $N_{nitrato}$ = nitrogênio nítrico disponibilizado pelo resíduo aplicado, mg. L^{-1}; e TR = taxa de recuperação de nitrogênio mineral pela cultura, $kg.kg^{-1}$. ano^{-1}.

3. Resultados

3.1. Água residuária tratada (biofertilizante)

Os valores médios das análises físico-química de algumas características da água residuária de bovinocultura de leite tratada na UPT (biofertilizante) utilizada na fertirrigação do rabanete foram:

- demanda química de oxigênio (DQO) = 90,62 mg. L^{-1};
- nitrito = 0,03 mg. L^{-1};
- nitrato = 0,88 mg. L^{-1};
- nitrogênio total = 67,8 mg. L^{-1};
- amônia = 25,2 mg. L^{-1};
- fóforo = 2,1 mg. L^{-1} ;
- pH = 7,53; e
- condutividade elétrica = 886,1 µS.cm^{-1}.

3.2. Desenvolvimento agronômico do rabanete

Os diferentes tratamentos com doses de água residuária da bovinocultura leiteira (ARB) não resultaram em diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros fitotécnicos do rabanete cultivado em vaso, colhidos aos 40 dias após o transplante, para as variáveis, massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea

(MSPA), massa fresca do bulbo (MFB), massa seca do bulbo (MSB), diâmetro do bulbo (DB), número de folhas (NF) e altura de planta (AP) (Figura1). Contudo, a dose de 200% de ARB proporcionou maiores valores médios para todas as variáveis avaliadas.

O segundo experimento de rabanete exibiu respostas positivas à aplicação de ARB, especialmente em volumes maiores, no entanto, todos os parâmetros fitotécnicos não exibiram diferenças estatísticas significativas, exceto para MFPA na dose de 300% de ARB (Figura 2). Em comparação com o experimento anterior, a MFPA neste experimento, nessa dose, teve um incremento de 87% na fitomassa fresca do rabanete.

3.3. Figuras 1 e 2 - Valores médios dos parâmetros fitotécnicos do rabanete cultivado em vasos e fertirrigado com diferentes doses de água residuária da bovinocultura leiteira (ARB), colhidos aos 40 dias após o transplante, ano de 2023 e 2024, primeiro e segundo cultivos respectivamente. A) massa fresca da parte aérea (MFPA); B) massa seca da parte aérea (MSPA); C) massa fresca do bulbo (MFB); D) massa seca do bulbo (MSB); E) diâmetro do bulbo (DB); F) número de folhas (NF); G) altura de planta (AP). Médias seguidas de mesma letra nas barras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

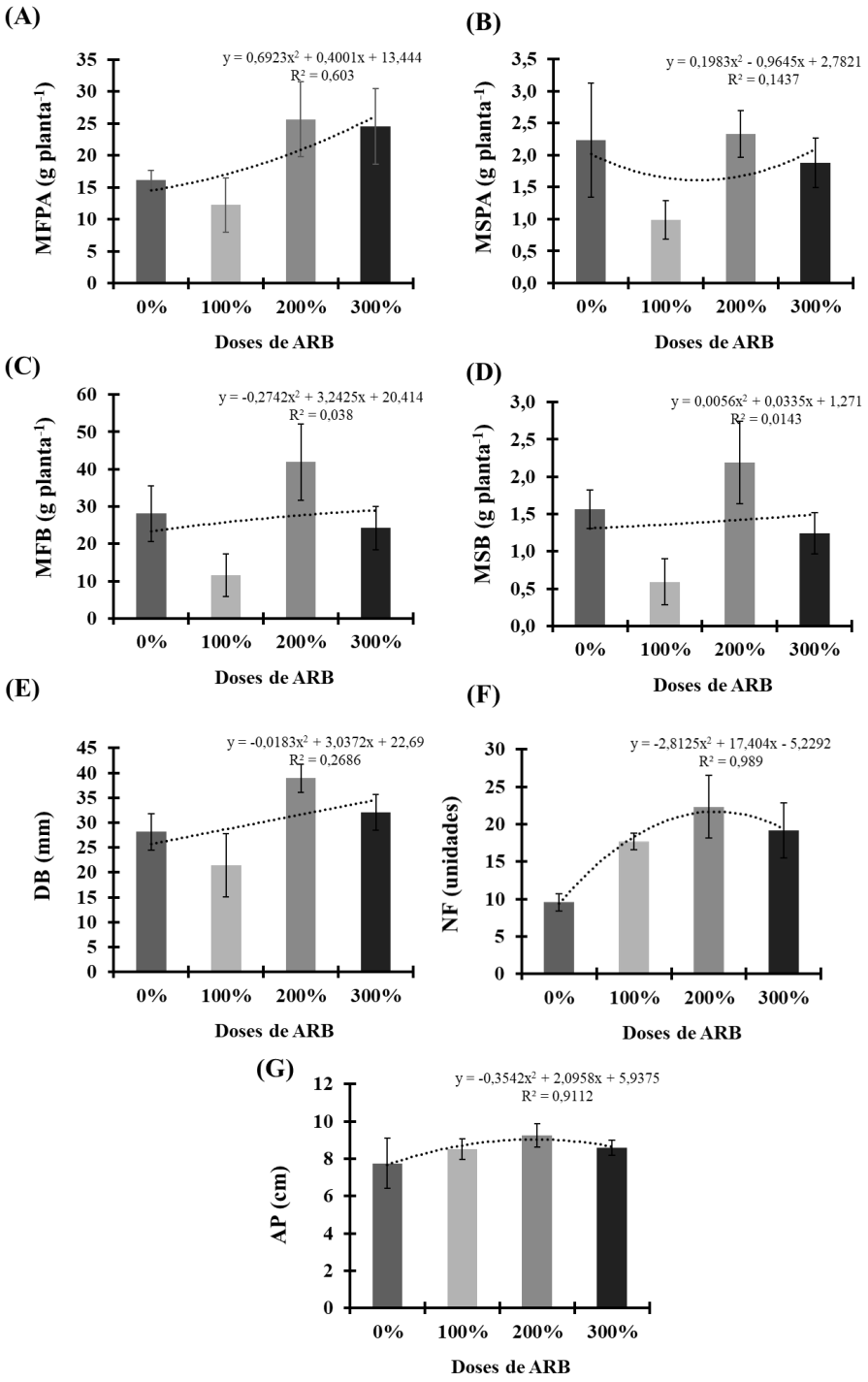


Figura 8. Valores médios dos parâmetros fitotécnicos do rabanete cultivado em vasos e fertirrigado com diferentes doses de água residuária da bovinocultura leiteira (ARB), colhidos aos 40 dias após o transplante, ano de 2023 (primeiro cultivo). A) massa fresca da parte aérea (MFPA); B) massa seca da parte aérea (MSPA); C) massa fresca do bulbo (MFB); D) massa seca do bulbo (MSB); E) diâmetro do bulbo (DB); F) número de folhas (NF); G) altura de planta (AP). Médias seguidas de mesma letra nas barras não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).

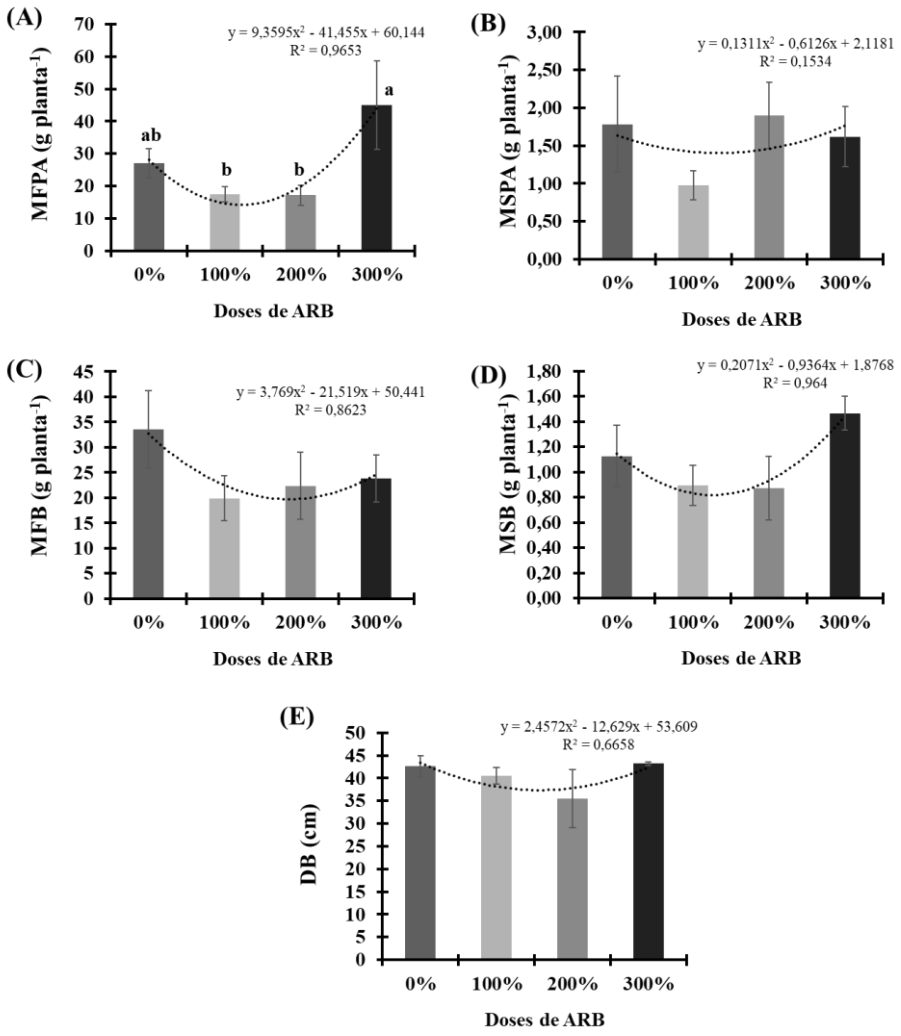


Figura 2. Valores médios dos parâmetros fitotécnicos do rabanete cultivado em vasos e fertirrigado com diferentes doses de água residuária da bovinocultura leiteira (ARB), colhidos aos 40 dias após o transplante, ano de 2024 (segundo cultivo). A) massa fresca da parte aérea (MFPA); B) massa seca da parte aérea (MSPA); C) massa fresca do bulbo (MFB); D) massa seca do bulbo (MSB); E) diâmetro do bulbo (DB); F) número de folhas (NF); G) altura de planta (AP). Médias seguidas de mesma letra nas barras não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).

4. Discussão

De acordo com [13] constataram que a maior produção, produtividade e acúmulo foliar de nutrientes foram observados quando se utilizou 400% da dose de N recomendada para o tomateiro por meio da ARB. segundo [3] verificaram que a ARB elevou a fertilidade do solo, o que resultou no aumento do desenvolvimento do rabanete, no que diz respeito ao comprimento da parte aérea, diâmetro do bulbo, massa seca da parte aérea e raiz e desempenho fotossintético. Entretanto, para o tratamento com 300% de ARB, os mesmos autores observaram um decréscimo no comprimento da parte aérea, no diâmetro do bulbo e na massa seca da parte aérea

e raiz, possivelmente, devido ao aumento das concentrações de sódio no solo. Segundo [12], observaram que houve aumento da produtividade da cenoura para todos os tratamentos com ARB, além da elevação nos teores de Ca e Mg. As raízes não apresentaram contaminação, o que comprova que as cenouras estavam aptas para consumo humano, proporcionando produtividade radicular superior à média nacional na dose de 100% N.

Por outro lado, um estudo sobre o impacto de diferentes concentrações de águas residuais tratadas na germinação de sementes de vários vegetais descobriu que a taxa de germinação e o alongamento da raiz de rabanete e ervilha foram afetados negativamente, enquanto o quiabo mostrou maior brotação com maiores concentrações de águas residuais [16]. Além disso, descobriu-se que a aplicação no solo de águas residuais na linha verde de um matadouro de gado aumentou a produtividade da biomassa foliar de *Brachiaria brizantha*, sugerindo benefícios potenciais da biofertirrigação com águas residuais em sistemas agrícolas [5].

Além disso, um método envolvendo a fermentação de águas residuais da pecuária para produzir fertilizantes microbianos demonstrou melhorar os resultados do plantio de hortaliças tipo fruto como pimentão, tomate e berinjela, destacando o potencial para reciclagem de resíduos e redução de custos na produção de fertilizantes [28].

Destaca-se também que, um estudo sobre o uso de águas residuais para irrigação no cultivo de vegetais como rabanete e cenoura demonstrou que, embora as águas residuais possam melhorar o crescimento e a produtividade das plantas, também apresentam riscos de acumulação de metais pesados no solo e nas plantas [15], o que nos alerta à importância do monitoramento e gerenciamento cuidadosos ao usar águas residuais para fins de irrigação de hortaliças e demais vegetais destinados à alimentação humana.

4. Conclusão

Os resultados indicam que, embora alguns parâmetros tenham mostrado respostas positivas à aplicação de ARB, especialmente com volumes maiores, com doses de 200% e 300%; não resultaram em diferenças estatisticamente significativas na maioria dos parâmetros fitotécnicos do rabanete.

Cabe destacar que o uso de volumes maiores de ARB mostra-se promissor para o incremento de alguns aspectos específicos das plantas, como o número de folhas e massa de raízes.

Referências

1. APHA. 2015 Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods. 5ed. American Public Health Association, Washington, D. C. Chapter 9, pp.103-120. 2015
2. BENNY, C. K.; CHAKRABORTY, S. 2023. Dyeing wastewater treatment in horizontal-and vertical constructed wetland using organic waste media. Journal of Environmental Management, [s. l.], v. 331, p. 117213,. 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723000014. Acesso em: 20 ago. 2023.
3. BORTONI, S. F.; SILVA, J. B. G.; SOUSA, C. P. 2024. Efeito residual da fertirrigação com água residuária de bovinocultura na qualidade de um solo Argilo-arenoso. Revista Engenharia na Agricultura - REVENG, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 452–463, 2018. Disponível em: https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/790. Acesso em: 28 jun. 2024.
4. BRIDGEWATER, L. L. (org.). 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd editioned. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
5. CARVALHO, J. LUZ, J. M.; HENRIQUES, J.; SILVA, J.G.; FERNANDES, R. B.; RIBEIRO S.; SILVA J. E. 2018. Biofertigation of Forage With Effluents From a Cattle Slaughterhouse Green Line: Impacts on Physical-Chemical Indicators of Soil Quality and on Production Biomass. Journal of Agricultural Science, [s. l.], v. 10, n. 7, p. p359, 2018. Disponível em: https://ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/74062. Acesso em: 28 jun. 2024.
6. CARVALHO, M. C.; GOMES J. C. S. M.; LIMA E. S. M.; ZONTA E.; MENDONÇAR. H. V. 2020. Recomendação de lâminas de fertirrigação com água residuária da bovinocultura. Congresso On-line: CONBEA, 2020.
7. DUARTE, J. B. 2019. Avaliação da eficiência de sistemas de alagado construído cultivados com Typha angustifolia (Rota 1) e Crysopogon zizanioides (Rota 2) no tratamento de águas residuárias de bovinocultura de leite. 2019. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2019. Disponível em: https://tede.ufrrj.br/jspui/bitstream/jspui/5631/2/2019%20-%20Jo%c3%a3o%20Brack%20Duarte.pdf. Acesso em: 19 ago. 2023.
8. ELAHI, E.; ABID, M.; Zhang, L.; ALUGONGO, G. M. 2017. The use of wastewater in livestock production and its socioeconomic and welfare implications. Environmental Science and Pollution Research, [s. l.], v. 24, n. 21, p. 17255–17266, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-017-9263-3. Acesso em: 20 ago. 2023.
9. ERTHAL, V. J. T.; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, O. G.; MATOS, A. T. 2010. Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertigadas com água residuária de bovinocultura. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 458–466, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000500002&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 20 ago. 2023.
10. FREIRE, L. R. (org.). Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. Brasília: Universidade Rural, 2013.
11. JORGE, M. F.; BATISTA DA SILVA, L. D.; BARROS, F. C.; LOPES, A. D.; HUTHER, C. M.; MELO, A. C. F.; CECCHIN D. 2022a. Influência da aplicação de água residuária bovina nos atributos químicos do solo cultivado com cenoura. Conjecturas, [s. l.], v. 22, n. 14, p. 891–906, 2022a. Disponível em: https://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/1827. Acesso em: 19 ago. 2023.
12. JORGE, M. F. BATISTA DA SILVA, L. D.; HUTHER, C. M.; CECCHIN D. MELO, A. C. F.; FRANCISCO, J. P.; LIOI, A. N.; ALVES D. G.; GUERRA, J. G. M. 2022b. Potential use of treated wastewater from cattle operation in the fertigation of organic carrots. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), [s. l.], v. 57, n. 4, p. 542–554, 2022b. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/1385. Acesso em: 28 jun. 2024.
13. JORGE, M. F.; PINHO, C. F.; LIOI, A. N.; ALVES, D. G.; ALMEIDA, G. V. SILVA, J. B. G.; BATISTA DA SILVA, L. D. 2017. Tomato fertigation with dairy cattle wastewater. Horticultura Brasileira, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 230–234, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/hb/a/vTv7JcQJqjYfBHF4FZmF55Q/?lang=en. Acesso em: 28 jun. 2024.
14. JORGE, M. F. 2018. Tratamento e disposição final de águas residuárias de bovinocultura em solos sob manejo orgânico de produção de olerícolas. 2018. 179 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2018.

15. KAUSAR, S.; FAIZAN, S.; HANEEF, I. 2017. Effect of Wastewater Irrigation on Heavy Metal Accumulation, Growth and Yield of Vegetables. INTERNATIONAL JOURNAL OF PLANT AND ENVIRONMENT, [s. l.], v. 3, n. 01, p. 65–76, 2017. Disponível em: https://ijplantenviro.com/index.php/IJPE/article/view/1187. Acesso em: 28 jun. 2024.
16. KHELIL, M. N.; DIMESSI, R. G.; MAHMOUDI, M; HACHICHA, M. 2022. Phytotoxic Effect of Treated Wastewater on Seed Germination and Percent Root Elongation Inhibition in Some Vegetable Crops. Journal of Scientific Research and Reports, [s. l.], v. 28, n. 9, p. 28–36, 2022. Disponível em: https://journaljsrr.com/index.php/JSRR/article/view/1389. Acesso em: 28 jun. 2024.
17. LÓPEZ-MOSQUERA, M. E.; FERNANDEZ-LEMA, E.; VILLARES, R.; CORRAL, R.; ALONSO, B.; BLANCO, C. 2009. Composting fish waste and seaweed to produce a fertilizer for use in organic agriculture. Procedia Environmental Sciences, [s. l.], v. 9, Ecological Engineering: from Concepts to Applications, Paris 2009, p. 113–117, 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029611007808. Acesso em: 19 ago. 2023.
18. MATOS, A. T. 2014. Tratamento e Aproveitamento Agrícola de Resíduos Sólidos. Viçosa, MG: UFV, 2014.
19. NENCIU, F. et al. "Zero-Waste" Food Production System Supporting the Synergic Interaction between Aquaculture and Horticulture. Sustainability, [s. l.], v. 14, n. 20, p. 13396, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13396. Acesso em: 19 ago. 2023.
20. NEVES, M. C. P. DE-POLLI, H.; PEIXOTO, R. T. dos G.; ALMEIDA, D. L. 2012. Sistema Integrado de Produção Agroecológica ou Fazendinha Agroecológica do km 47. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (org.). Agroecologia: Princípios e Técnicas Para uma Agricultura Orgânica Sustentável. 2. ed. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2012. p. 163–195.
21. ONU. 2022. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [S. l.], 2022. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 28 jul. 2022.
22. ORGANOSSOLO. 2023. Organosolo – Transformar resíduos em vida. In: Rio de Janeiro-RJ, 2022. Disponível em: https://www.organosolo.com/. Acesso em: 20 ago. 2023.
23. PELISSARI, C.; SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.;.CARVALHO JUNIOR, O.; DECEZARO, S. T.; WOLFF, D. B. 2019. Incorporação de nitrogênio e fósforo no tecido foliar da macrófita Typha domingensis Pers. durante o tratamento de efluente da bovinocultura leiteira em wetlands construídos. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 585–590, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/Nqrc6gSKRVgz5DJHfK5XqVJ/?lang=pt. Acesso em: 20 ago. 2023.
24. SHAHMOHAMADLOO, R. S.; FEBRIA, C. M.; FRASER, E. D. G; SIBLEY, P. K. 2022. The sustainable agriculture imperative: A perspective on the need for an agrosystem approach to meet the United Nations Sustainable Development Goals by 2030. Integrated Environmental Assessment and Management, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1199–1205, 2022. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ieam.4558. Acesso em: 19 ago. 2023.
25. SILVA, J. L. L. N. ALMEIDA, G. V.; ALVES, D. G.; BATISTA DA SILVA, L. D. 2018. Sistema alagado construído com cultivo de arroz utilizado para tratamento de água residuária de bovinocultura de leite. Revista Craibeiras de Agroecologia, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1–5, 2018. Disponível em: https://www.seer.ufal.br/ojs2-somente-consulta/index.php/era/article/view/5627. Acesso em: 20 ago. 2023.
26. SOUZA, E. F. F. da S. 2020. Cultivo do tomate cereja utilizando biomassa vegetal não compostada de grama batatais e água residuária de bovinocultura de leite.. 29 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2020. Disponível em: https://tede.ufrrj.br/handle/jspui/6065. Acesso em: 19 ago. 2023.
27. TRANI, P. E.; FORNASIER, J. B.; LISBÃO, R. S. 1992. Cultura da Rúcula: Boletim Técnico. Campinas - SP: Instituto Agronômico de Campinas, 1992. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/arquivos/iacbt146.pdf. Acesso em: 19 ago. 2023.
28. ZHITANG, L. 2014 Method for producing bio-organic fertilizer through fermentation wastewater and agricultural waste. Depositante: China. CN104250119A. Depósito: 22 set. 2014. Concessão: 31 dez. 2014.

Effects of Nanobubble-Saturated Irrigation Solutions on Greenhouse Soil Properties in Almería (SE Spain)

Fernando del Moral Torres[1,2*], Rafael Hernández Maqueda[1,2], David Meca Abad[3], Ángel J. Aguirre de Juana[4], José Manuel Rato Nunes[5].

Departament of Agronomy. University of Almería; fmoral@ual.es, rafahm@ual.es

[2] CIAIMBITAL, Research Centre for Mediterranean Intensive Agrosystems and Agrifoof Biotechnology, University of Almería, Carretera de Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, Spain.

[3] Estación Experimental de Cajamar Las Palmerillas, Fundación Cajamar, Grupo Coop. Cajamar; davideriкmeca@fundacioncajamar.com

[4] Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza; jaguirre@unizar.es

[5] Escola Superor de Biociências de Elvas. Politécnico de Portalegre; ratonunes@ipportalegre.pt

* Correspondence: fmoral@ual.es;

Abstract: This study aimed to evaluate the impact of fertigation solutions saturated with air (MNBA) or oxygen (MNBO) nanobubbles on the physicochemical properties of soil in intensive greenhouse cropping systems in southeastern Spain. Nanobubble treatments significantly increased dissolved oxygen levels at the dripper outlet, altering soil carbon and nitrogen dynamics. Organic matter mineralization was enhanced, leading to reductions in total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC), while total elemental carbon remained unchanged. Contrary to previous findings, nitrogen fractions showed no significant variations. A decrease in cation exchange capacity was observed, likely due to the decline in organic carbon content. However, key soil physical properties, including aggregate stability, available water content, and bulk density, were not affected by nanobubble treatments.

Keywords: Tomato; Terric Anthrosol; oxygation; dissolved oxygen; fertigation.

1. Introduction

Numerous active soil aeration techniques have been introduced in recent decades, including the injection of pressurized air into irrigation water (oxygation) [1–6]) the generation of macro- or microbubbles of air [7,8], and the addition of peroxides such as H_2O_2 [9,10], K_2O_2 [9,10], CaO_2 [11], urea hydrogen peroxide [12,13] or peracetic acid [14] to irrigation solutions. However, these methods are either costly or inefficient [15]. Furthermore, none of these techniques have been widely adopted

in agriculture due to factors such as limited cost-effectiveness, insufficient experimentation, or the absence of standardized protocols for field-scale application [16,17].

The use of nanobubbles (ultrafine bubbles with a diameter <1 μm, according to ISO 20480-1:2017) in high frequency irrigation systems is presented as a promising method to improve soil oxygenation mainly around emitters where hypoxic conditions occur more frequently [2,15,18–20]. Nanobubbles exhibit a large specific surface area, long residence time, high gas-liquid mass transfer efficiency, high zeta potential, and hydroxyl radical production [21–24] and allow easy implementation in irrigation systems. Additionally, they allow higher levels of dissolved oxygen to be maintained in the aqueous phase compared to traditional aeration methods [25,26]. But the use of air- or oxygen-nanobubbles causes an oxidative shift in soil redox conditions [27,28] and, hypothetically, this can affect different soil properties on which its functionality depends and, therefore, its capacity to offer ecosystem services.

The objective of this work was to determine the existence and, where appropriate, the magnitude of the changes produced in different physicochemical properties of the soil, basic for its functionality, as a consequence of the use of fertigation solutions saturated with nanobubbles of air or oxygen in comparison with a control, in intensive greenhouse crops in south-eastern Spain.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental site.

A tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.) was cultivated in soil within a plastic greenhouse at the 'Las Palmerillas' experimental station (Cajamar Foundation) in El Ejido, Almería, Spain. The greenhouse had a galvanized steel multi-span structure, a gable roof with passive ventilation, and was covered with a trilaminated low-density polyethylene film. Climate control was automated.

The soil was a Terric Anthrosol, characteristic of the region's "enarenado" system, consisting of a top coarse sand mulch (0–10 cm), an imported loam soil layer (10–40 cm), and an underlying sandy clay loam of low agronomic quality (>40 cm). Before the experiment, the loam layer was plowed (30 cm depth) and amended with sheep manure (3.6 kg m^2), agricultural gypsum, wheat straw, and ammonium nitrate.

Above-ground drip irrigation was used for fertigation, with 5028 m^3 ha^{-1} of water applied per treatment in 150 irrigation events. Drip lines were spaced 2.0 m apart, with emitters at 0.25 m intervals, delivering 1.1 L h^{-1}. Irrigation doses and frequency

were adjusted to maintain soil water tension between 10–20 kPa. Further details on fertilization, nutrient solution composition, phenological stages, and greenhouse climate conditions are available in del Moral et al. [29].

2.2. Experimental design.

A randomized complete block design (RCBD) was used to assess oxygen (MNBO) and air nanobubbles (MNBA) in fertigation for tomato cultivation, with a control receiving only the nutrient solution. The greenhouse had three blocks, each with three rows of 24 plants. Border plants and rows were excluded to minimize edge effects. Treatments were randomly assigned within blocks for statistical robustness. Bulk nanobubbles were generated via cavitation using the generator equipment model NB 100.6 from the company Nanobubbles S.L. Two reservoir tanks were used where the fertigation solution was saturated with oxygen nanobubbles ($2.5 \times 10^8 \pm 1.7 \times 10^7$ particles mL^{-1}; 29.78 ± 1.17 mg O_2 L^{-1}) or air nanobubbles ($1.93 \times 10^8 \pm 4.09 \times 10^7$ particles mL^{-1}; 7.6 ± 0.3 mg O_2 L^{-1}) before being pumped into the greenhouse in each irrigation event. The oxygen concentration in the control treatment without nanobubbles was 5.6 ± 0.7 mg O_2 L^{-1}.

2.3. Soil sampling and analyses.

Soil sampling was conducted twice: before irrigation and transplanting (Precrop) and after crop removal (Postcrop). Three drippers per replication were randomly selected, and three subsamples were taken per dripper at 0–15 cm depth. Subsamples were combined into a composite sample per replication. Samples were kept at 4°C until analysis.

Field-moist samples were air-dried, sieved (2 mm), and analyzed. Total organic carbon and dissolved organic carbon (1:5 soil/water) were measured via wet oxidation. Oxidizable organic carbon was measured according Weil et al. [30], using potassium permanganate. Total elemental carbon and nitrogen were analyzed using an elemental analyzer, and mineral nitrogen fractions were extracted with KCl 2M, and analyzed according Mulvaney [31]. Organic nitrogen was calculated as the difference between total nitrogen and inorganic nitrogen. Cation exchange capacity and base saturation were determined according to the methodology of the Soil Conservation Service, [32]. Available water capacity was measured using Richards' method of pressure plates, as the difference between the moisture contents at 33 and 1500 kPa. Bulk density was measured using the unaltered core ring method. Basal soil respiration (expressed as cumulative mg C-CO_2 kg^{-1} values for 33 days of measurement), was measured using an infrared CO_2 sensor (IRGA S151, Qubit Systems Inc., Canada) on soils held at the same water holding capacity [33].

2.3. Statistical analyses.

After checking the assumptions of normality and homoscedasticity, significant differences in soil properties across nanobubble treatments were determined using a univariate generalized linear model (randomised block design with block and nanobubble treatments as independent variables with no interaction) and Duncan and Tukey post-hoc test at the significance level of $p < 0.05$ for nanobubble treatments. Spearman's correlations were made. All these analyses were performed using SPSS v.20.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) and JASP v.0.19.3 (University of Amsterdam).

3. Results

3.1. Dissolved oxygen concentration in soil irrigation solutions.

Table 6 shows the average concentration of dissolved oxygen measured in the irrigation solutions collected at the dripper outlet during the course of the experiment. These concentrations were similar to those obtained in other studies with air or oxygen nanobubbles for water aeration. [34,35]. The concentration of dissolved oxygen in the irrigation solution when gaseous oxygen was used as the internal gas in the nanobubbles was, on average, 3.5 times higher than when the internal gas of the nanobubbles was air and 5.4 times higher than the solution used as a control.

Table 6. *Average (± MSE) concentration of dissolved oxygen (mg L^{-1}) in the irrigation solutions at the dripper outlet. (n=7).*

	Irrigation solution
Oxygen nanobubbles	24.2 ± 1.7
Air nanobubbles	7.0 ± 0.2
Control	4.51 ± 0.6

3.2. Forms of carbon in the soil. Soil basal respiration.

No significant differences were observed in the total carbon content, determined by elemental analyzer (Figure 5). However, a trend towards a reduction in the average content of all organic forms of carbon was observed from the beginning of cultivation (pre-crop) towards the end of cultivation (post-crop). This reduction was significant in the case of total organic carbon ($p<0.05$), with the MNBO treatment showing the lowest content. Soluble organic carbon was significantly lower for the air nanobubble treatment. The values for organic carbon oxidizable with potassium permanganate, although they followed a similar trend to those for total organic

carbon, did not show statistically significant differences between the different treatments, probably due to the dispersion of the data analyzed in the preliminary phase of the crop.

Accumulated soil basal respiration showed a significant reduction ($p<0.05$) from the beginning[A] of the experiment (1256.79 (MSE=395.71)[B] mg C-CO_2 kg^{-1} dry soil)[a] to the final states of the different treatments control: 679.99 (MSE= 18.16); MNBA: 580.91 (MSE= 72.25); MNBO: 693.8 (MSE=203.38). These treatments did not show significant differences between them.

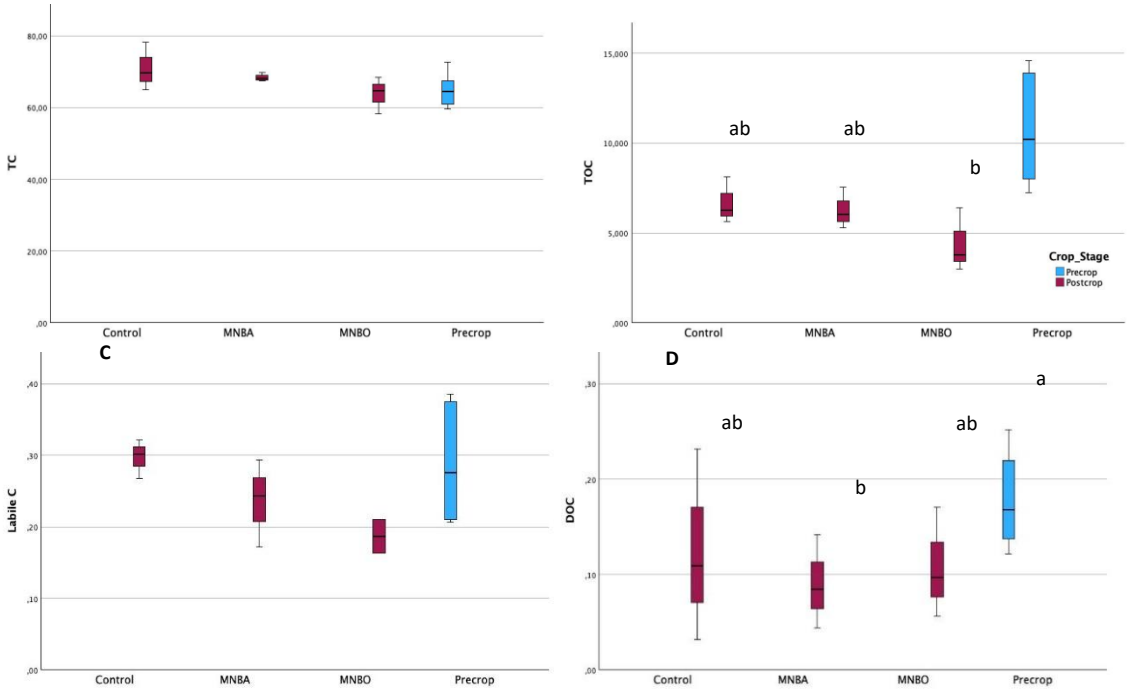


***Figure 5**. Forms of carbon in the soil. A: Total elemental carbon (TC; g kg^{-1}); B: Total organic carbon (TOC; g kg^{-1}); C: Carbon oxidizable potassium permanganate (Labile C; g kg^{-1}); D: Dissolved organic carbon (DOC; g kg^{-1}). Pre-crop: Content before planting and start of irrigation. Post-crop: Content after the end of the experiment for each of the treatments. MNBO: Oxygen nanobubbles. MNBA: Air nanobubbles. Different letters indicate statistically significant differences (p<0,05).*

3.3. Forms of nitrogen in the soil.

No statistically significant differences were found in the total elemental nitrogen content between the different treatments (Figure 6) or between these and the initial state before starting the crop. However, a significant reduction in total organic nitrogen levels was found from the beginning to the end of the crop, which was independent of the treatments applied. The Tukey HSD test, used as a post-hoc test, indicated that the Norg in MNBA treatment is inferior to the others with a p-value of 0.076, which recommends taking precautions when accepting the null hypothesis.

3.3. Cation Exchange Capacity and Base saturation.

Table 7 shows the results obtained from the analysis of cation exchange capacity and exchangeable bases. In general, a decrease in the cation exchange capacity from the initial values was observed over the duration of the experiment, with significant differences only for the MNBO treatment (p-value = 0.076), which showed the lowest value. The divalent cations associated with the exchange complex, Ca^{2+} and Mg^{2+}, also showed a tendency to decrease from the initial values, this decrease being significant for the treatment with air nanobubbles in the case of calcium (p-value= 0.08) and for the control in the case of magnesium (p-value <0.05). The monovalent cations Na^{+} and K^{+} showed no differences between the initial and final states or between the different treatments.

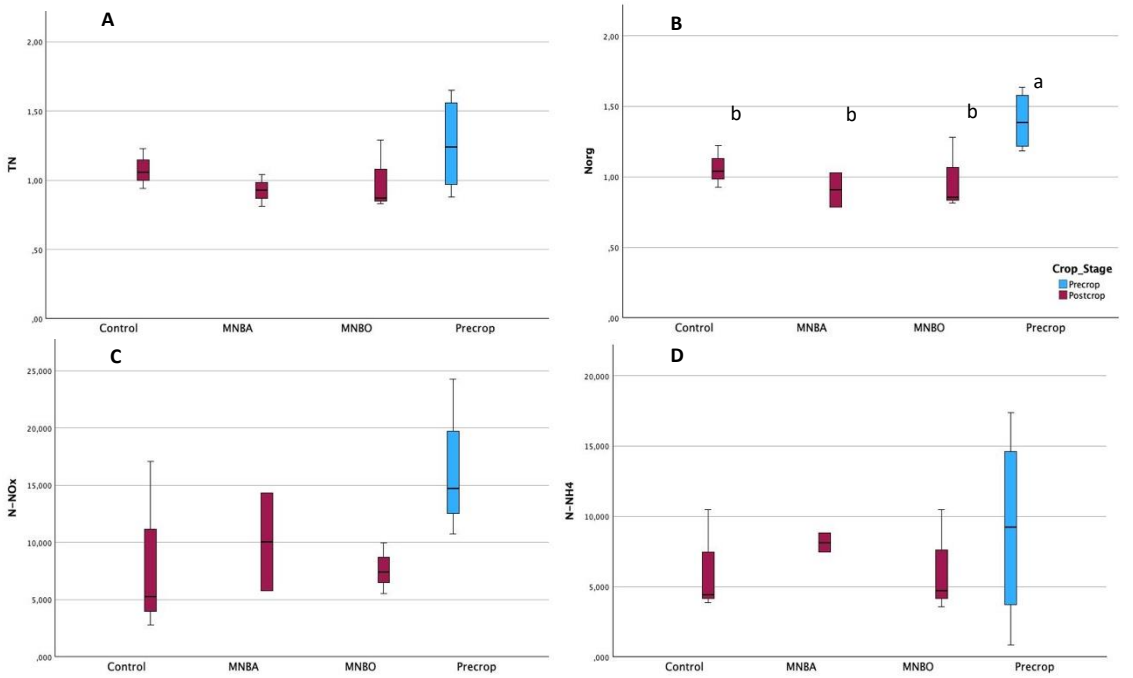


Figure 6. *Forms of nitrogen in the soil. A: Total elemental nitrogen (TN; g kg^{-1}); B: Total organic nitrogen (Norg; g kg^{-1}); C: Total Nitrogen Oxides (N-NOx; mg kg^{-1}); D: Total Ammonia Nitrogen (N-NH$_4$; mg kg^{-1}). Pre-crop: Content before planting and start of irrigation. Post-crop: Content after the end of the experiment for each of the treatments. MNBO: Oxygen nanobubbles. MNBA: Air nanobubbles. Different letters indicate statistically significant differences (p<0.05).*

Table 7. *Cation exchange capacity (CEC) and base saturation (cmol kg^{-1}). MNBA: Air Nanobubbles treatment; MNBO: Oxygen nanobubbles treatment. MSE: Mean Standard Error. Different letters indicate significant differences (CEC and Ca p-value <0.1; Mg p-value <0.05)*

	Before irrigation		Control		MNBA		MNBO	
	Mean	MSE	Mean	MSE	Mean	MSE	Mean	MSE
CEC	18.67 a	0.93	15.51 ab	1.09	15.92 ab	2.16	15.17 b	0.75
Ca^{2+}	8.98 a	0.81	7.03 ab	1.19	5.7 b	1.33	6.87 ab	0.9
Mg^{2+}	2.23 a	0.26	1.14 b	0.21	1.53 ab	0.14	1.4 ab	0.3
Na^{+}	1.84	0.42	1.36	0.12	1.45	0.12	1.36	0.08
K^{+}	5.63	0.13	5.97	0.85	7.25	0.85	5.54	0.43

3.4. Available water capacity, Structural stability and bulk density.

No significant differences were found in any of these parameters determining the physical quality of the soil (Table 8).

Table 8. *AWC: Available water capacity, Stables aggregates and bulk density values. MNBA: Air nanobubbles; MNBO: Oxygen nanobubbles. MSE: Mean standard error.*

	Before irrigation		Control		MNBA		MNBO	
	Mean	MSE	Mean	MSE	Mean	MSE	Mean	MSE
AWC (kg kg^{-1})	0.16	0.01	0.14	0.01	0.15	0.01	0.14	0.01
Stable aggregates (%)	29.61	2.1	36.16	5.87	32.94	1.19	39.88	1.1
Bulk density (g cm^{-3})	1.57	0.02	1.61	0.02	1.6	0.01	1.63	0.03

3.5. Correlations

Figure 7 shows Spearman's correlation coefficients heatmap between the different variables studied. Significant positive correlations were observed between all forms of organic carbon and the total and organic nitrogen contents. The accumulated basal respiration of the soil also correlated positively and significantly with the forms of organic carbon and with the contents of total nitrogen and organic nitrogen.

The cation exchange capacity showed a significant positive correlation with the dissolved organic carbon content. Exchangeable magnesium was significantly and positively correlated with the mineral nitrogen content, in both its forms, $N\text{-}NH_4$ and

N-NOx, but not with the total or organic nitrogen content. It also showed a significant positive correlation with the soil's basal respiration.

Exchangeable sodium, on the other hand, was positively correlated with total organic carbon and soluble organic carbon. It was also positively correlated with soil basal respiration.

The structural stability of aggregates in water correlated significantly, but negatively, contrary to expectations, with the exchangeable calcium content. Finally, there was also a significant negative correlation between available moisture content and bulk density of the soil.

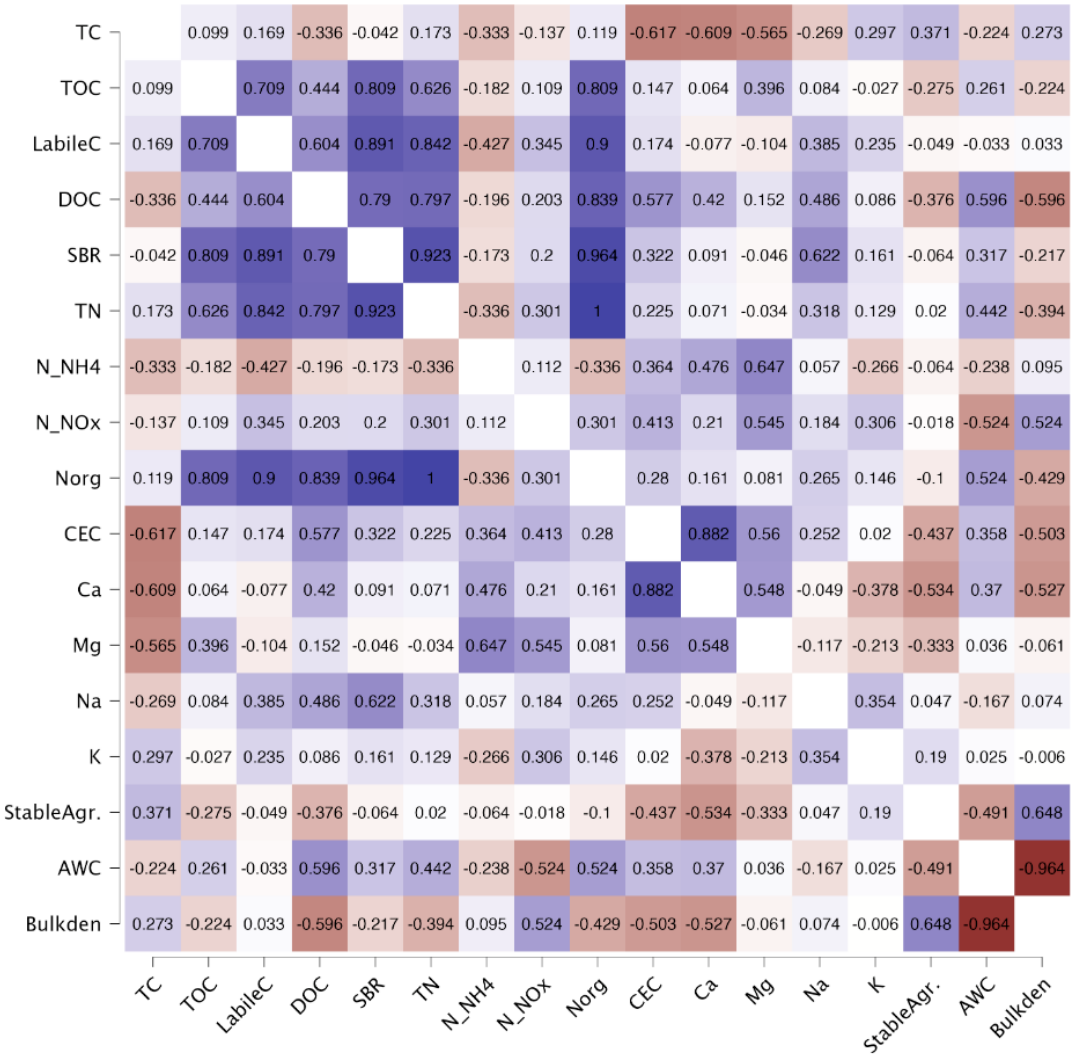


Figure 7. *Spearman´s rho heatmap. TC: Total elemental carbon; TOC: Total organic carbon; LabileC: Oxidizable organic carbon; DOC: Dissolved organic carbon; SBR: Soil Basal Respiration; TN: Total elemental Nitrogen; Norg: Total organic nitrogen; CEC: Cation Exchange Capacity; StableAgr. Stable aggregates; AWC: Available water capacity; Bulkden: Bulk density.*

4. Discussion

Field studies investigating the effects of nanobubbles in fertigation within intensive horticultural systems remain limited, particularly those conducted under non-production-limiting conditions with appropriate controls.

Regardless of whether oxygen or air was used for nanobubble generation, the saturation of fertigation solutions significantly increased dissolved oxygen levels at the dripper outlet in all irrigation events compared to the control. These findings align with previous studies utilizing similar technology [15,34]. Consequently, reductions in various organic carbon fractions were observed, with a significant decrease in total organic carbon (TOC) in the MNBO treatment and dissolved organic carbon (DOC) in the MNBA treatment. However, total elemental carbon levels remained unchanged. These results contrast with those reported by Zhou et al. [36], who, in a similar greenhouse tomato study, found higher total carbon and organic matter contents in treatments with increased oxygen levels.

A similar discrepancy was observed for total nitrogen content. While Zhou et al. reported increased nitrogen levels in response to higher oxygen concentrations, our results indicate that nanobubble treatments had no significant impact on nitrogen fractions or, at most, showed a tendency to reduce nitrogen content. Zhou et al. attributed their results to differential microbiological activity associated with the rhizosphere, where they sampled. The origin of the discrepancies can then be explained by Li et al. [37] as it indicates that soil aeration has a differential influence on the rhizosphere zone than on the rest of the soil, which is the object of our interest.

Correlation analysis suggests that the behavior of carbon and nitrogen forms, particularly organic fractions, follows a similar pattern. The progressive decline in soil organic carbon content throughout a greenhouse crop cycle has been previously described by Salinas et al. [38]. The enrichment of fertigation solutions with oxygen by means of nanobubbles appears to accelerate the mineralization of soil organic matter, leading to a reduction in organic carbon levels. This process may, in turn, influence nitrogen contents, total cation exchange capacity and basal soil respiration. The potential impact of declining organic carbon on total cation exchange capacity and the distribution of exchangeable bases is modulated by both organic and mineral fertilization regimes. Notably, we observed a significative correlation between exchangeable Na^{+} and the soil organic fraction, as well as between Mg^{2+} and mineral nitrogen content. These relationships suggest that the primary sources of these ions are linked to organic matter decomposition and fertilization inputs, respectively.

5. Conclusions

The use of nanobubbles in fertigation significantly increased dissolved oxygen levels at the dripper outlet, influencing soil carbon and nitrogen dynamics. Nanobubble treatments accelerated organic matter mineralization, reducing organic carbon fractions, particularly TOC and DOC, while total elemental carbon remained unchanged. Despite previous findings suggesting increased nitrogen content, our results showed no significant effect on nitrogen forms.

Author Contributions: Conceptualization, del Moral, F., Hernández, R. and Rato-Nunes, J.; methodology, del Moral, F. and Meca, D.; formal analysis, del Moral, F. and Aguirre, A.J.; investigation, All authors; resources, Meca, D.; data curation, Aguirre, A.J. and del Moral, F.; writing—original draft preparation, del Moral, F..; writing—review and editing, All authors.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding

Data Availability Statement: Data can be requested by e-mailing the corresponding author.

Acknowledgments: Fernando del Moral is grateful for the funding received from the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities for stays by senior professors and researchers at foreign centers within the framework of the mobility subprogram of the 2021-2023 State Plan for Scientific, Technical and Innovation Research.

The authors would like to thank the company Nanobubbles S.L. for providing the equipment for the field trials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Ben-Noah, I.; Friedman, S.P. Review and Evaluation of Root Respiration and of Natural and Agricultural Processes of Soil Aeration. *Vadose Zone Journal* 2018, *17*, 1–47, doi:10.2136/vzj2017.06.0119.
2. Abuarab, M.; Mostafa, E.; Ibrahim, M. Effect of Air Injection under Subsurface Drip Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Corn in a Sandy Clay Loam Soil. *J Adv Res* 2013, *4*, 493–499, doi:10.1016/j.jare.2012.08.009.
3. Bhattarai, S.P.; Pendergast, L.; Midmore, D.J. Root Aeration Improves Yield and Water Use Efficiency of Tomato in Heavy Clay and Saline Soils. *Sci Hortic* 2006, *108*, 278–288, doi:10.1016/j.scienta.2006.02.011.
4. Vyrlas, P.; Sakellariou-Makrantonaki, M.; Kalfountzos, D. Aerogation: Crop Root-Zone Aeration through Subsurface Drip Irrigation System. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 2014, *10*, 250–255.
5. Pendergast, L.; Bhattarai, S.P.; Midmore, D.J. Evaluation of Aerated Subsurface Drip Irrigation on Yield, Dry Weight Partitioning and Water Use Efficiency of a Broad-Acre Chickpea (Cicer Arietinum, L.) in a Vertosol. *Agric Water Manag* 2019, *217*, 38–46, doi:10.1016/j.agwat.2019.02.022.
6. Zhao, F.; Sun, J.; Jiang, Y.; Hu, D.; Yang, X.; Dong, M.; Yu, K.; Yu, S. Effect of Rhizosphere Aeration by Subsurface Drip Irrigation with Tanks on the Growth of 'Red Globe' Grape Seedling and Its Absorption, Distribution and Utilization of Urea- 15 N. *Sci Hortic* 2018, *236*, 207–213, doi:10.1016/j.scienta.2018.03.041.
7. Park, J.S.; Ohashi, K.; Kurata, K.; Lee, J.W. Promotion of Lettuce Growth by Application of Microbubbles in Nutrient Solution Using Different Rates of Electrical Conductivity and under Periodic Intermittent Generation in a Deep Flow Technique Culture System. *Eur J Hortic Sci* 2010, *75*, 198–203.

8. Abu-Shahba, M.S.; Mansour, M.M.; Mohamed, H.I.; Sofy, M.R. Comparative Cultivation and Biochemical Analysis of Iceberg Lettuce Grown in Sand Soil and Hydroponics With or Without Microbubbles and Macrobubbles. *J Soil Sci Plant Nutr* 2021, *21*, 389–403, doi:10.1007/s42729-020-00368-x.
9. Quan, L.-J.; Zhang, B.; Shi, W.-W.; Li, H.-Y. Hydrogen Peroxide in Plants: A Versatile Molecule of the Reactive Oxygen Species Network. *J Integr Plant Biol* 2008, *50*, 2–18, doi:10.1111/j.1744-7909.2007.00599.x.
10. Abd Elhady, S.A.; El-Gawad, H.G.A.; Ibrahim, M.F.M.; Mukherjee, S.; Elkelish, A.; Azab, E.; Gobouri, A.A.; Farag, R.; Ibrahim, H.A.; El-Azm, N.A. Hydrogen Peroxide Supplementation in Irrigation Water Alleviates Drought Stress and Boosts Growth and Productivity of Potato Plants. *Sustainability (Switzerland)* 2021, *13*, 1–16, doi:10.3390/su13020899.
11. Hou, J.; Zhang, D.; Zhou, J.; Xu, Z.; Mou, P.; Cao, Y.; Zhu, J. Oxygenated Compound Fertilizer Improved Rice Yield by Empowering Soil Aeration. *Commun Soil Sci Plant Anal* 2021, *52*, 1798–1810, doi:10.1080/00103624.2021.1900219.
12. Wang, R.; Shi, W.; Kronzucker, H.J.; Li, Y. Oxygenation Promotes Vegetable Growth by Enhancing P Nutrient Availability and Facilitating a Stable Soil Bacterial Community in Compacted Soil. *Soil Tillage Res* 2023, *230*, 105686, doi:10.1016/j.still.2023.105686.
13. Wang, R.; Shi, W.; Li, Y. Link Between Aeration in the Rhizosphere and P-Acquisition Strategies: Constructing Efficient Vegetable Root Morphology. *Front Environ Sci* 2022, *10*, doi:10.3389/fenvs.2022.906893.
14. Carrasco, G.; Gajardo, J.M.; Álvaro, J.E.; Urrestarazu, M. Rocket Production (Eruca Sativa Mill.) in a Floating System Using Peracetic Acid as Oxygen Source Compared with Substrate Culture. *J Plant Nutr* 2011, *34*, 1397–1401, doi:10.1080/01904167.2011.581045.
15. Baram, S.; Weinstein, M.; Evans, J.F.; Berezkin, A.; Sade, Y.; Ben-Hur, M.; Bernstein, N.; Mamane, H. Drip Irrigation with Nanobubble Oxygenated Treated Wastewater Improves Soil Aeration. *Sci Hortic* 2022, *291*, 110550, doi:10.1016/j.scienta.2021.110550.
16. Friedman, S.P.; Naftaliev, B. A Survey of the Aeration Status of Drip-Irrigated Orchards. *Agric Water Manag* 2012, *115*, 132–147, doi:10.1016/j.agwat.2012.08.015.
17. Ben-Noah, I.; Friedman, S.P. Aeration of Clayey Soils by Injecting Air through Subsurface Drippers: Lysimetric and Field Experiments. *Agric Water Manag* 2016, *176*, 222–233, doi:10.1016/j.agwat.2016.06.015.
18. Bhattarai, S.P.; Huber, S.; Midmore, D.J. Aerated Subsurface Irrigation Water Gives Growth and Yield Benefits to Zucchini, Vegetable Soybean and Cotton in Heavy Clay Soils. *Annals of Applied Biology* 2004, *144*, 285–298, doi:10.1111/j.1744-7348.2004.tb00344.x.
19. Bhattarai, S.P.; Midmore, D.J.; Pendergast, L. Yield, Water-Use Efficiencies and Root Distribution of Soybean, Chickpea and Pumpkin under Different Subsurface Drip Irrigation Depths and Oxygation Treatments in Vertisols. *Irrig Sci* 2008, *26*, 439–450, doi:10.1007/s00271-008-0112-5.
20. Zhu, Y.; Cai, H.; Song, L.; Chen, H. Aerated Irrigation Promotes Soil Respiration and Microorganism Abundance around Tomato Rhizosphere. *Soil Science Society of America Journal* 2019, *83*, 1343–1355, doi:10.2136/sssaj2018.08.0299.
21. Agarwal, A.; Ng, W.J.; Liu, Y. Principle and Applications of Microbubble and Nanobubble Technology for Water Treatment. *Chemosphere* 2011, *84*, 1175–1180, doi:10.1016/j.chemosphere.2011.05.054.
22. Foudas, A.W.; Kosheleva, R.I.; Favvas, E.P.; Kostoglou, M.; Mitropoulos, A.C.; Kyzas, G.Z. Fundamentals and Applications of Nanobubbles: A Review. *Chemical Engineering Research and Design* 2023, *189*, 64–86, doi:10.1016/j.cherd.2022.11.013.
23. Ghaani, M.R.; Kusalik, P.G.; English, N.J. Massive Generation of Metastable Bulk Nanobubbles in Water by External Electric Fields. *Sci Adv* 2020, *6*, 1–7, doi:10.1126/sciadv.aaz0094.
24. Zhang, Z.-H.; Wang, S.; Cheng, L.; Ma, H.; Gao, X.; Brennan, C.S.; Yan, J.-K. Micro-Nano-Bubble Technology and Its Applications in Food Industry: A Critical Review. *Food Reviews International* 2022, 1–23, doi:10.1080/87559129.2021.2023172.
25. Azevedo, A.; Oliveira, H.; Rubio, J. Bulk Nanobubbles in the Mineral and Environmental Areas: Updating Research and Applications. *Adv Colloid Interface Sci* 2019, *271*, 101992, doi:10.1016/j.cis.2019.101992.
26. Marcelino, K.R.; Ling, L.; Wongkiew, S.; Nhan, H.T.; Surendra, K.C.; Shitanaka, T.; Lu, H.; Khanal, S.K. Nanobubble Technology Applications in Environmental and Agricultural Systems: Opportunities and Challenges. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2022, *0*, 1–26, doi:10.1080/10643389.2022.2136931.

27. Minamikawa, K.; Makino, T. Oxidation of Flooded Paddy Soil through Irrigation with Water Containing Bulk Oxygen Nanobubbles. *Science of the Total Environment* 2020, *709*, 136323, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136323.
28. Xue, S.; Marhaba, T.; Zhang, W. Supporting Information Nanobubble Watering Affects Nutrient Release and Soil Characteristics. *ACS Agricultural Science & Technology* 2022, *2*, 1–8.
29. del Moral Torres, F.; Hernández Maqueda, R.; Meca Abad, D.E. Enhancing Root Distribution, Nitrogen, and Water Use Efficiency in Greenhouse Tomato Crops Using Nanobubbles. *Horticulturae* 2024, *10*, 463, doi:10.3390/horticulturae10050463.
30. Weil, R.R.; Islam, K.R.; Stine, M.A.; Gruver, J.B.; Samson-Liebig, S.E. Estimating Active Carbon for Soil Quality Assessment: A Simplified Method for Laboratory and Field Use. *American Journal of Alternative Agriculture* 2003, *18*, 3–17, doi:10.1079/AJAA2003003.
31. Mulvaney, R.L. *Methods of Soil Analysis*; Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E., Eds.; SSSA Book Series; Soil Science Society of America, American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, 1996; ISBN 9780891188667.
32. Soil Conservation Service, U.S.D.A. *Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Samples.*; Soil Surv. Invest. Rep. 1., 1972;
33. Vilaplana, D.F.; Lucas-Borja, M.E.; Soria, R.; Miralles, I.; Ortega, R.; Abdennbi, S.; Carmona-Yáñez, M.D.; Plaza-Alvarez, P.A.; Santana, V.M.; Zema, D.A. One-Year Effects of Stand Age, Pre-Fire Treatments, and Hillslope Aspect on Recovery of Plant Diversity and Soil Properties in a Mediterranean Forest Burnt by a Severe Wildfire. *For Ecol Manage* 2024, *566*, 122068, doi:10.1016/j.foreco.2024.122068.
34. Baram, S.; Evans, J.F.; Berezkin, A.; Ben-Hur, M. Irrigation with Treated Wastewater Containing Nanobubbles to Aerate Soils and Reduce Nitrous Oxide Emissions. *J Clean Prod* 2021, *280*, 124509, doi:10.1016/j.jclepro.2020.124509.
35. Liu, Y.; Zhou, Y.; Wang, T.; Pan, J.; Zhou, B.; Muhammad, T.; Zhou, Ch.; Li, Y. Micro-Nano Bubble Water Oxygation: Synergistically Improving Irrigation Water Use Efficiency, Crop Yield and Quality. *J Clean Prod* 2019, *222*, 835–843, doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.208.
36. Zhou, Y.; Bastida, F.; Liu, Y.; He, J.; Chen, W.; Wang, X.; Xiao, Y.; Song, P.; Li, Y. Impacts and Mechanisms of Nanobubbles Level in Drip Irrigation System on Soil Fertility, Water Use Efficiency and Crop Production: The Perspective of Soil Microbial Community. *J Clean Prod* 2021, *333*, 130050, doi:10.1016/j.jclepro.2021.130050.
37. Li, Y.; Niu, W.; Wang, J.; Liu, L.; Zhang, M.; Xu, J. Effects of Artificial Soil Aeration Volume and Frequency on Soil Enzyme Activity and Microbial Abundance When Cultivating Greenhouse Tomato. *Soil Science Society of America Journal* 2016, *80*, 1208–1221, doi:10.2136/sssaj2016.06.0164.
38. Salinas, J.; Meca, D.; del Moral, F. Short-Term Effects of Changing Soil Management Practices on Soil Quality Indicators and Crop Yields in Greenhouses. *Agronomy* 2020, *10*, doi:10.3390/agronomy10040582.

Plataforma Arduíno para Monitoramento da Irrigação no Cultivo do Tomateiro

Daniel Fonseca de Carvalho[1,*], Michel Douglas Santos Ribeiro[2], Leonardo Oliveira Medici[3] and Marinaldo Ferreira Pinto[2]

Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ); carvalho@ufrrj.br (D.F.C.); mfpufrrj@yahoo.com.br (M.F.P.)

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, UFRRJ; mycheldouglass@gmail.com

Departamento de Ciências Fisiológicas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; lmedici@gmail.com

* Autor de correspondência: carvalho@ufrrj.br; +55 21 98787-7262 (D.F.C.)

Resumo: Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de controle e monitoramento da irrigação utilizando Arduino Mega, que foi avaliado no cultivo do tomateiro. O trabalho foi realizado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O sistema de controle e monitoramento foi programado para receber sinal emitido por um acionador automático de irrigação (AAI), que opera em resposta à tensão de água no solo. O tomateiro híbrido "Dominador F1" foi cultivado em solo (T1) e no sistema Verdeponia, com aparas de grama e gliricidia (T2). As plantas foram irrigadas com emissores de vazão nominal de 2,0 L h^{-1}. O cultivo foi realizado em área experimental, no período de maio a outubro de 2023. A produção de frutos foi contabilizada ao longo de 10 colheitas, totalizando 21 semanas de ciclo. Nesse período houve 137 acionamentos, com tempo médio diário de irrigação de 13,30 min, possibilitando a aplicação de 58,48 L por planta. As plantas produziram, em média, 4,18 kg (T1) e 5,95 kg (T2) de tomate, equivalente a produtividades de 83,56 e 119,06 kg ha^{-1}. A plataforma desenvolvida acoplada ao AAI apresentou desempenho satisfatório no monitoramento das irrigações, possibilitando o controle e a quantificação da necessidade hídrica do tomateiro.

Palavras-chave: manejo da irrigação; acionamento automático; *Solanum lycopersicum* L.

1. Introdução

No sistema de produção agrícola, a água é um dos recursos mais críticos e para manter altos rendimentos das culturas é necessário o atendimento das suas necessidades hídricas nas diferentes fases de desenvolvimento [1]. A quantidade de água necessária às culturas depende da espécie, da variedade e das condições edafoclimáticas [2], e se refere ao volume de água necessário para manter as taxas máximas de evapotranspiração da cultura (ETc), garantindo assim que a mesma não sofra estresse hídrico [3].

Os sistemas de irrigação devem ser manejados com eficiência para que não ocorra irrigação excessiva ou deficitária, que podem causar redução na produtividade e na qualidade das culturas, aumento dos custos de bombeamento e lixiviação de nutrientes solúveis da zona radicular [4]. O manejo da irrigação pode ser implementado por meio de sensores de umidade do solo, que permitem o fornecimento e/ou reposição de água ao solo na quantidade e momento oportunos [5-7].

Uma abordagem mais racional para otimizar o uso da água de irrigação é a associação de técnicas de automação aos sistemas de irrigação. Muitos pesquisadores relataram que automação em projetos de irrigação usando controladores inteligentes e uma rede de sensores podem economizar água em até 38% [8]. Utilizando o microcontrolador Arduino UNO, [4] apresentam um dispositivo acoplado a tensiômetros que permite ao agricultor conhecer o conteúdo de água do solo e programar a irrigação com relação às necessidades da cultura. Portanto, além do emprego da automação, o uso de plataformas que permitam o registro das informações relacionadas aos eventos de irrigação, como frequência de acionamento, tempo de funcionamento e volume aplicado, são importantes ferramentas no gerenciamento dos recursos hídricos em áreas irrigadas.

O tomate (Solanum *lycopersicum* L.), pertencente à família Solanaceae, é o vegetal mais consumido no mundo, juntamente com outras espécies como as batatas, as berinjelas, as petúnias, o tabaco e as pimentas [9]. É considerada uma espécie de alto custo de produção, com longa estação de crescimento e altas necessidades de água e nutrientes. Entretanto, a quantidade de nutrientes absorvido pela planta dependerá de fatores ambientais abióticos e bióticos, podendo variar com o tipo de solo, condições climáticas, tratos culturais e o sistema e o manejo da irrigação.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de controle e monitoramento da irrigação utilizando a plataforma de prototipagem Arduino, e promover sua avaliação em campo em um cultivo orgânico de tomate.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Setor de Horticultura da UFRRJ (Seropédica, RJ, Brasil) (latitude 22º 45’48” S; longitude 43º 41’ 19” W; altitude de 33,0 m). As mudas foram preparadas em bandejas plásticas com 128 células preenchidas com substrato comercial (Carolina Soil®), utilizando sementes comerciais de cravo ‘Chabaud Gigante’ de flores dobradas vermelhas (Isla®, Brasil).

O trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizada no munícipio de Seropédica, Estado do Rio de Janeiro, Brasil (22°46'29,55" S e 43°41'12,16" W).

O sistema de controle e monitoramento das irrigações, visando a coleta e o armazenamento de dados foi composto de uma placa Arduino Mega 2560 e componentes como relés, módulos de tensão, SD card, dentre outros (Figura 1). O Arduino foi programado para receber sinal emitido por um acionador automático de irrigação (AAI) [10], possibilitando a quantificação do volume de água aplicado e o tempo de acionamento.

Figura 1. Componentes do sistema de controle e monitoramento do sistema de irrigação. 1: Arduino mega; 2: Modulo relé; 3: Módulo de cartão SD; 4: transformador de 24 VCA; 5: pressostato; 6: Módulo regulador de tensão; 7: módulo RTC; 8: motobomba; 9: válvula solenoide.

O AAI utiliza o princípio do tensiômetro e se caracteriza como de fácil construção e instalação em campo. É composto por uma cápsula cerâmica, uma mangueira de polietileno e um pressostato ou sensor de nível (Figura 2). A cápsula cerâmica é o sensor de tensão de água no solo e deve ser instalada na profundidade que representa o sistema radicular da cultura. O pressostato deve estar posicionado abaixo da cápsula e é exatamente essa diferença de nível que define a tensão de acionamento do sistema de irrigação.

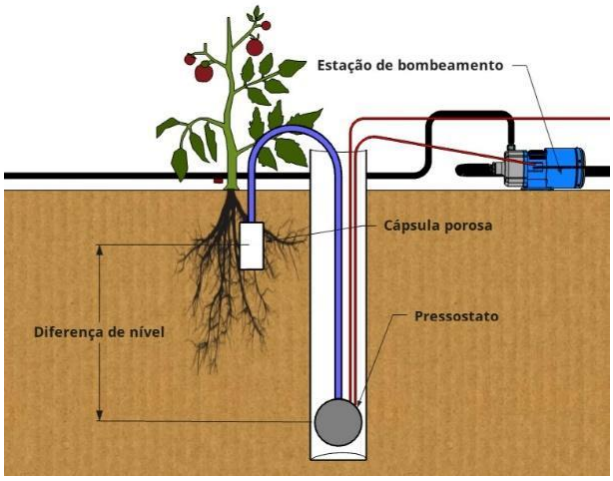


Figura 2. Esquema de instalação dos componentes do acionador automático para irrigação (AAI).

Em função da evapotranspiração do cultivo, o conteúdo de água no solo ou substrato irá diminuir provocando uma tensão na cápsula que é transmitida pelo tubo flexível até o pressostato. Quando essa tensão atingir o valor correspondente à coluna de água, equivalente à diferença de nível entre o sensor e o pressostato, o diafragma do pressostato aciona um comutador, fechando o contato do terminal comum com o terminal normalmente aberto. Como o terminal comum está conectado em 0 V (nível baixo), esse sinal é transmitido à porta digital do Arduino, conforme esquema elétrico apresentado na Figura 3.

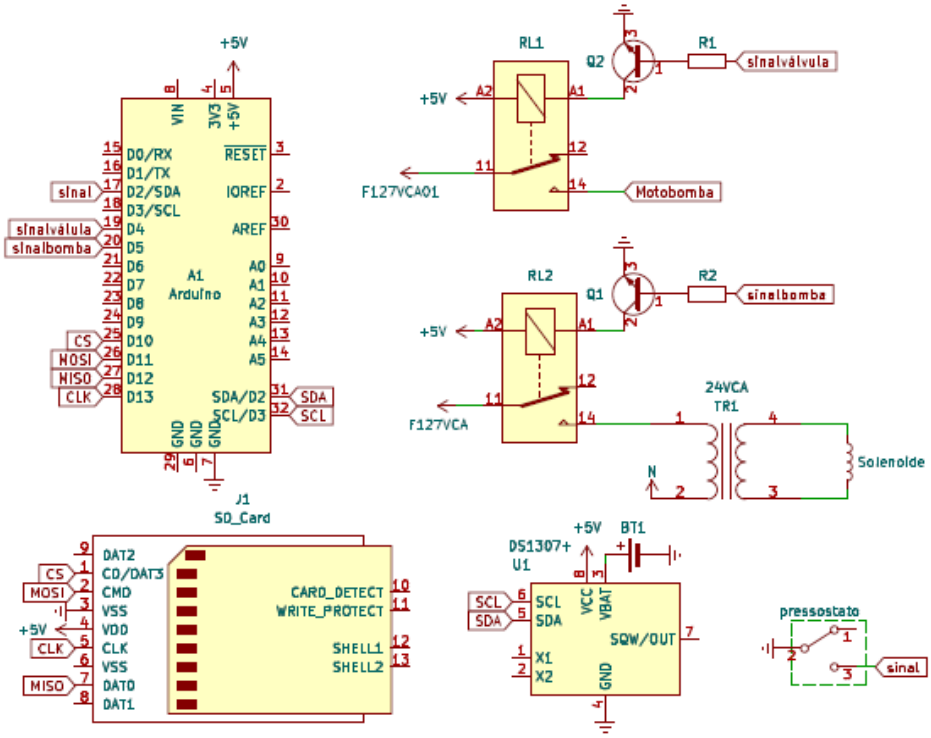


Figura 3. Esquema elétrico do sistema de controle e monitoramento da irrigação por meio do AAI.

Ao detectar o sinal elétrico, o Arduino emite os sinais elétricos de acionamento de dois relés, aos quais estão conectadas à motobomba e/ou válvula solenoide, fornecendo água ao sistema de irrigação. Após umedecimento do solo, a tensão na cápsula é aliviada, fazendo com que o sinal elétrico seja interrompido, indicando o final da irrigação. Sendo assim, o sistema de controle abre os contatos dos relés, desligando a motobomba e/ou fechando a válvula solenoide. Portanto, o próprio potencial matricial da água no solo ou substrato irá comandar o sistema, evitando aplicações excessivas ou deficitárias.

A necessidade de dois relés se deveu ao fato de que a alimentação elétrica da motobomba é de 127 VCA e a válvula solenoide é de 24 VCA. Para obtenção da tensão de 24 VCA empregou-se um transformador com capacidade de 1 A. A lógica de controle de acionamento da válvula e da motobomba, bem como registro do momento da irrigação e sua duração está apresentada no fluxograma da Figura 4.

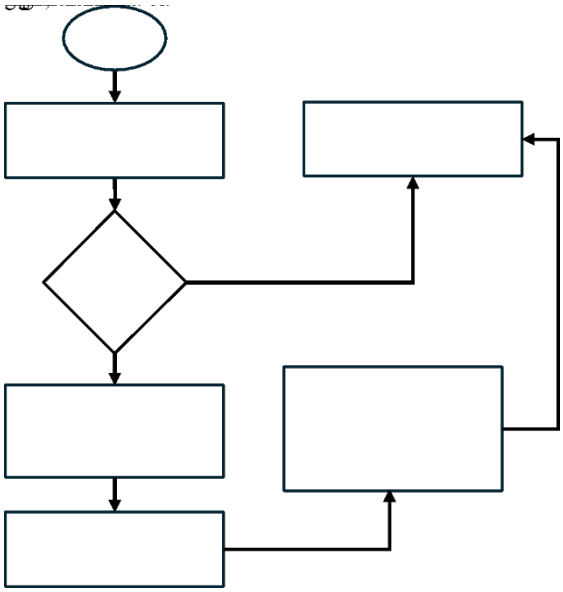


Figura 4. Fluxograma do algoritmo embarcado no sistema de controle e monitoramento da irrigação por meio do AAI.

A fim de avaliar o sistema de coleta e armazenamento de dados desenvolvido foi instalado um experimento de campo, no período de Maio a Setembro de 2023, em uma área experimental do campus da UFRRJ. O tomate (Solanum lycopersicum L.), híbrido Dominador F1 da Topseed, do grupo Caqui, foi cultivado diretamente no solo (T1) e também no sistema de Verdeponia (T2), que consiste na utilização de material verde não compostado como fonte principal ou parcial de nutrientes, proporcionando melhorias na qualidade química, biológica e física do solo e no desenvolvimento de plantas [11]. Neste ensaio foram utilizadas aparas de gramas (Paspalum notatum) e folhas de glirícidia (Gliricidia septium), na proporção de 50%, além do tratamento controle, utilizando solo + composto fermentado do tipo Bokashi. A área foi preparada para o plantio em sistema de covas (Figura 5), com

dimensões de 0,25 m de diâmetro e 0,30 m de profundidade, simulando um vaso de, aproximadamente, 8,0 L.

As plantas foram irrigadas por gotejamento, cujo sistema era composto por linhas laterais constituídas por mangueiras de polietileno de 16 mm e emissores autocompensantes com vazão nominal de 2,0 L h^{-1} (PCJ-LCNL/Netafim). Após avaliação em campo, o sistema apresentou vazão média de 1,92 L h^{-1}, a uma pressão de 8,0 kPa, e uniformidade de distribuição de 92%. Para o manejo da irrigação, o AAI foi instalado na parcela correspondente ao tratamento controle, utilizando tensão de acionamento de 4 kPa.

As colheitas foram realizadas a partir dos 70 dias após o transplantio, no início do processo de amadurecimento, quando os frutos apresentavam coloração verde-rosado. Ao todo houve 10 colheitas, totalizando 21 semanas de ciclo. Foram considerados os dados médios coletados das quatro plantas úteis, sendo avaliados a produção total de frutos ao longo das colheitas, a produção total por planta (PTP), e produtividade estimada por planta (PRODT).

Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizou-se o software R Studio. As médias dos fatores foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 1 e 5% de probabilidade.

(a) (b)

Figure 5. Preparo da área em covas (a) e posterior preenchimento com material vegetal (b).

3. Resultados

Ao longo do período experimental houve 324,8 mm de precipitação, enquanto a evapotranspiração de referência (ETo), estimada por Penman-Moteith FAO 56, totalizou 454,3 mm. Em resposta às condições meteorológicas e de acordo com o armazenamento de dados na plataforma desenvolvida houve 137 acionamentos, com tempo variando de 0,61 a 32,52 min (Figura 6).

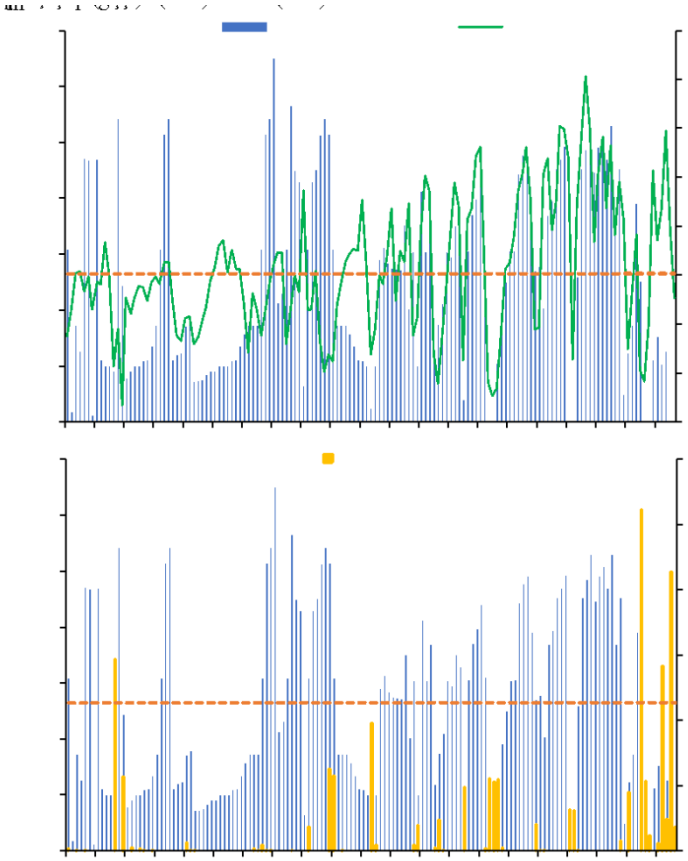
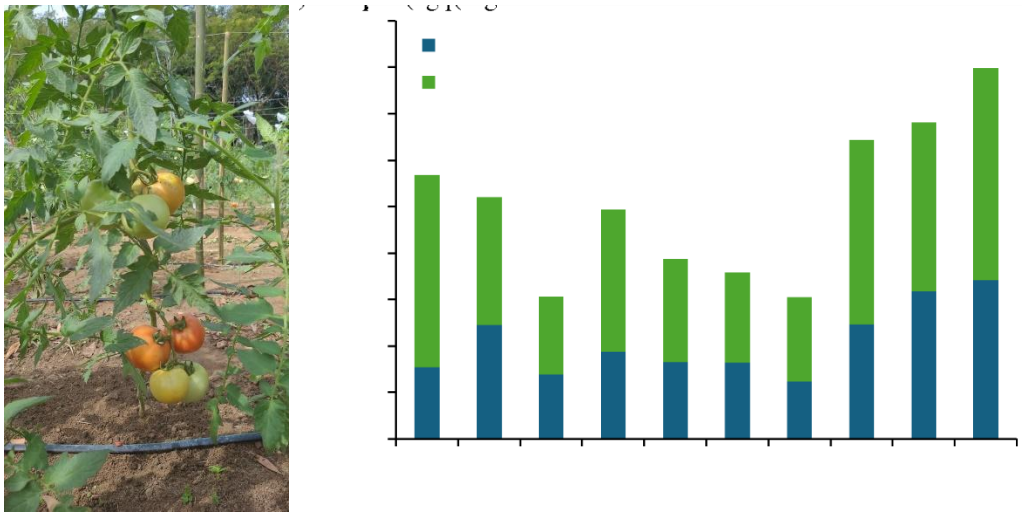


Figura 6. Tempo de acionamento do sistema de irrigação e lâminas de ETo (A) e de precipitação (B).

O tempo médio de acionamento foi de 13,3 min, aplicando um volume médio de 58,48 L por planta. O sistema de irrigação não foi acionado em apenas 7 dias durante todo o período de avaliação, o que evidencia que o sistema de controle da irrigação proporciona irrigação de alta frequência, conforme os requisitos da microirrigação.

Além das características meteorológicas, o sistema foi acionado de acordo com a necessidade hídrica da cultura, que se desenvolveu adequadamente (Figura 7a). No tratamento controle, a produção de tomate variou, em média, de 0,247 a 0,684 kg por planta, enquanto na Verdeponia, a produção variou de 0,335 a 0,912 kg por planta. A produção média total foi de 4,18 e de 5,95 kg por planta, respectivamente, indicando uma produtividade de 83,56 e de 119,06 kg ha^{-1} (Figura 7b).



(a) (b)

Figure 7. Plantas de tomateiro em campo (a) e produção obtida no tratamento controle e no sistema de Verdeponia.

4. Discussão

Ao longo do período de cultivo houve dias sem acionamento do sistema de irrigação (Figura 6), o que não está associado a falhas técnicas, e sim à ocorrência de precipitação. Portanto, o sistema foi capaz de responder tanto à necessidade hídrica da planta quanto à ocorrência de precipitação pluviométrica. Também não foram verificadas falhas de registro das irrigações, o que proporcionou a adequada contabilização do tempo de irrigação e, consequentemente, do volume de água em cada evento de irrigação e em cada tratamento, que é uma informação primordial em estudos que envolvem necessidade hídrica dos cultivos. Os resultados obtidos demonstram que o sistema de controle e monitoramento da irrigação por meio do AAI apresentou um desempenho adequado, atendendo plenamente as necessidades do estudo, tanto no que se refere à coleta das informações necessárias, como quanto à robustez ao longo do tempo de avaliação.

Ressalta-se também que ambos os sistemas, Arduíno e AAI, são de relativamente baixo custo, podendo ser adotados sem necessidade de grande investimento, além de serem robustos e requerem pouca manutenção. Os resultados evidenciam a eficiência do sistema de controle e registro dos eventos de irrigação, que indicam a ocorrência de eventos de irrigação com maior duração na fase de produção de frutos do tomateiro e também de acordo com a evapotranspiração da cultura.

5. Conclusões

O sistema desenvolvido apresentou um desempenho adequado no monitoramento das irrigações ao longo do ciclo, possibilitando o controle e a quantificação da necessidade hídrica do tomateiro.

A plataforma desenvolvida apresentou desempenho satisfatório ao registrar os sinais do AAI e acionar a motobomba e a válvula solenoide. O sistema permitiu o registro dos tempos de irrigação para o cálculo da necessidade hídrica da cultura e posterior comparação com o desenvolvimento das plantas e meteorológicas locais. O principal objetivo do trabalho era a avaliação da plataforma de controle e monitoramento da irrigação, contudo o trabalho também contém dados relevantes acerca da Verdeponia, evidenciando a viabilidade desta técnica de cultivo inovadora que dispensa a compostagem no uso de biomassa vegetal como substrato e adubo de plantas.

Contribuição dos Autores: Conceitualização, D.F.C., M.D.S.R., L.O.M. e M.F.P.; metodologia, D.F.C., M.D.S.R., L.O.M. e M.F.P.; validação, M.D.S.R. e M.F.P.X.X.; análise formal, D.F.C. e M.D.S.R.; investigação, D.F.C. e M.D.S.R.; recursos, D.F.C.; curadoria de dados, M.D.S.R.; redação — preparação do rascunho original, D.F.C. e M.F.P.; redação — revisão e edição, D.F.C., L.O.M. e M.F.P.; supervisão, D.F.C, L.O.M. e M.F.P.; administração do projeto, D.F.C.; aquisição de financiamento, D.F.C. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este trabalho é financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (305919/2022-9).

Agradecimentos: Nós agradecemos à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por viabilizar a infraestrutura necessária ao desenvolvimento do trabalho.

Conflitos de interesse: Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

1. UDDAMERI, V.; CHASEMINEJAD, A.; HERNANDES, E. A. A tiered stochastic framework for assessing crop yield loss risks due to water scarcity undes diferente uncertainty levels. *Agricultural Water Management* 2020, *238*, 106226.
2. CRUZ, E. C.; CORELL, M.; MORIANA, A.; HERNANZ, D.; STINCO, M.; BRAHM, P.; MARTINEZ, J. M. Effect of regulated deficit irrigation on commercial quality parameters, carotenoids, phenolics and sugars of the black cherry tomato (*Solanum lycopersicum* L.) ʿSunchocolaʾ. *Journal of Food Composition and Analysis* 2022, *105*, 104220.
3. INCROCCI, L.; THOMPSON, R. B.; FERNANDEZ, M. D.; PASCALE, S.; PARDOSSI, A.; STANGHELLINI, C.; ROUPHAEL, Y.; GALLARDO, M. Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management* 2020, *242*, 106393.
4. HASNAIN, S.; SINGH, A. Development of electronic wetting front detector for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management* 2022, *274*, 107980.
5. DIAS, G.C.O.; MEDICI, L.O.; VASCONCELLOS, M.A.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C. Papaya seedlings growth using a low-cost, automatic watering controller. *Revista Brasileira de Fruticultura* 2013, *35*, 527-535.
6. GOMES, D.P.; CARVALHO, D.F.; ALMEIDA, W.S.; MEDICI, L.O.; GUERRA, J.G.M. Organic carrot-lettuce intercropping using mulch and different irrigation levels. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 2014, *12*, 323-328.
7. NASCIMENTO, F. A. L.; SILVA, A. J. P.; FREITAS, F. T. O.; FERNANDES, R. D. M.; LUCIO ADERITO VEIMROBER JUNIOR, L. A. Sensors and frequencies of soil water content measurement

affecting agro-hydrological simulations and irrigation management. *Computers and Electronics in Agriculture* 2022, *194*, 106763.

8. AL-GHOBARU, H. M.; MOHAMMAD, F. S.; MARAZKY, M. S. A. E.; DEWIDAR, A. Z. Automated irrigation systems for wheat and tomato crops in arid regions. *Water SA* 2017, *43*, 354-364.
9. CAPOBIANCO-URIARTE, M.; APARICIO, J.; VALENCIANO, J. P.; BELMONTE, M. P. The European tomato market: an approach by export competitiveness maps. *PLos* 2021, *16*, 1-27.
10. MEDICI, L. O.; ROCHA, H.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R.A. Automatic controller to water plants. *Scientia Agricola* 2010, *67*, 727–730.
11. SOUZA, E. F. F. S.; MEDICI, L. O.; GENTILE, M. A. D.; HASSANPOURAGHDAM, M. B.; CARVALHO, D. F. SILVA, L. D. B. S. Grass (paspalum notatum) clippings, with and without cattle wastewater, supported production of organic cherry tomatoes in pots. *Biological Agriculture & Horticulture* 2021, *38*, 29-39.

Produção de Cravos de Corte em Resposta e Suplementação Hídrica por Acionamento Automático e Fertirrigação com Água Residuária de Bovinocultura

Daniel Fonseca de Carvalho[1,*], Giovani de Azevedo Silva[2], Letícia Marques da Silva[2], Isaac da Mota Moraes[2], Henrique Vieira de Mendonça[1] and Rogério Gomes Pêgo[3]

Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; carvalho@ufrrj.br (D.F.C.); henriqueufv@gmail.com (H.V.M.)

Discente da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 20230008974@ufrrj.br (G.A.S.); leticia.marques2456@hotmail.com (L.M.S.); isaacmoraes560@ufrrj.br (I.M.M.)

Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; engagropego@yahoo.com.br (R.G.P.)

* Autor de correspondência: carvalho@ufrrj.br; +55 21 98787-7262 (D.F.C.)

Resumo: Neste trabalho avaliou-se o efeito da fertirrigação com água residuária de bovinocultura (ARB) e de volumes de água no crescimento de hastes florais de cravo de corte (*Dianthus caryophyllus* L.). O experimento foi realizado de maio a setembro de 2024, utilizando vasos de 8,0 L dispostos em casa de vegetação. Foram avaliados 4 níveis de suplementação hídrica e 4 doses de fertirrigação. O manejo da irrigação foi realizado com sensores automáticos, em resposta à tensão de água no solo, instalados nas parcelas correspondentes às maiores vazão (3,0 L h^{-1}) e dose de fertirrigação (32 mg N L^{-1} por planta). Foram avaliados a altura (A), o diâmetro (DH) e a massa fresca (MF) das hastes florais, além do diâmetro da flor (DF). Houve 77 irrigações, com aplicação de 12,57 L de água por planta, no tratamento de maior vazão. Os fatores influenciaram isoladamente a altura (modelos polinomiais) e a massa fresca das plantas (modelos lineares), enquanto os valores de DH e DF variaram de 3,57 a 3,75 mm, e de 4,72 a 5,0 cm, respectivamente. É possível concluir que o manejo eficiente da irrigação e uso de ARB tratada favorecem o crescimento das plantas de cravo de corte.

Palavras-chave: manejo da irrigação; planta ornamental; *Dianthus caryophyllus* L.

1. Introdução

A crescente demanda por cultivos ecológicos e sustentáveis de plantas ornamentais tem impulsionado a pesquisa científica a buscar alternativas de produção que minimizem os gastos por impute de insumos e recomendam, entre outras técnicas, o reaproveitamento de resíduos como fonte de novos substratos, o controle biológico de pragas e doenças, uso de fontes alternativas de fertilizantes e o

eficiente uso da água de irrigação [1]. Dentre essas, o uso de águas residuárias tem sido recomendada para produção de plantas ornamentais, pois reduz a dependência de fertilizantes sintéticos e oferece vantagens econômicas e ambientais [2].

O reuso da água residuária da bovinocultura (ARB) constitui uma das tecnologias de maior impacto no uso racional desse recurso o que caracteriza uma economia circular, conceito que abrange a conversão de resíduos em nutrientes, fechamento de ciclos e o respeito socioambiental [3,4]. Estudos confirmam que os nutrientes presentes ARB possibilitam a nutrição de planas ornamentais como gérbera e girassol [5,6].

Outro importante fator de produção que afeta diretamente a qualidade de plantas ornamentais é a disponibilidade hídrica. Plantas crescidas sob condições de déficit hídrico intenso produzem hastes florais curtas e flores menores, incompatíveis para comercialização [7-10]. A adequada disponibilidade hídrica no cultivo de planta é importante para manter o turgor dos tecidos vegetais e possibilitar a nutrição via fluxo de nutrientes minerais do substrato de cultivo [11].

Uma das espécies ornamentais mais cultivadas em todo o mundo é cravo (*Dianthus caryophyllus* L.) cuja comercialização é majoritariamente como flor de corte ou plantas envasadas [12]. Por isso os métodos de cultivo devem garantir alta produtividade de flores com elevado valor estético como, por exemplo, o crescimento vigoroso da haste floral, boa produtividade de flores e hastes florais mais rígidas.

Estudos anteriores mostram que o gênero *Dianthus* conseguem se adaptar às condições de déficit hídrico, possibilitando sua sobrevivência quando crescidas em solos mais secos, sendo essa uma importante característica para a sobrevivência dessas plantas em ambientes de ocorrência natural [13]. No entanto, para atender o exigente mercado da floricultura é importante que as flores produzidas apresentam alto valor estético. Por isso, é importante suprir as demandas hídricas da planta de cravo ou ainda as cultivas sob condições de déficit hídrico controlado, condições que otimiza o uso da água em sistemas agrícolas, sem afetar a produtividade ou a qualidade de plantas [14].

São escassos os trabalhos científicos que buscam estabelecer métodos sustentáveis para a produção de cravos, sobretudo da eficiência de águas residuárias da bovinocultura como alternativa de nutrição e os impactos do cultivo sob déficit hídrico sobre a qualidade de hastes florais. Por isso, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da fertirrigação com água residuária de bovinocultura (ARB)

e de volumes de água no crescimento de hastes florais de cravo de corte (*Dianthus caryophyllus* L.).

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Setor de Horticultura da UFRRJ (Seropédica, RJ, Brasil) (latitude 22º 45'48" S; longitude 43º 41' 19" W; altitude de 33,0 m). As mudas foram preparadas em bandejas plásticas com 128 células preenchidas com substrato comercial (Carolina Soil®), utilizando sementes comerciais de cravo 'Chabaud Gigante' de flores dobradas vermelhas (Isla®, Brasil).

A semeadura foi realizada no dia 22 de abril de 2024 em bancadas de apoio e, em 24 de maio, as plântulas foram transportadas e alocadas em vasos de 8,0 L que foram devidamente preparados e conectados ao sistema de abastecimento de modo a garantir a irrigação das plantas (Figura 1a).

(a) (b)

Figura 1. Mudas de cravo transplantadas nos vasos (a) e layout do ensaio experimental (b).

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualisados, em esquema fatorial 4x4, com 5 repetições e com três plantas por parcela experimental (vaso), totalizando 240 mudas em 80 vasos (Figura 1b). Os tratamentos consistiram na aplicação de diferentes volumes de irrigação (fator 1), a partir de emissores (PCJ-LCNL/Netafim) com vazão nominal de 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 L h-1. O manejo da irrigação foi realizado de forma automática com o uso do Acionador Automático de Irrigação (ASI) [15], que opera em resposta a tensão da água no solo permitindo a aplicação da água em resposta à necessidade hídrica das mudas (Figura 2).

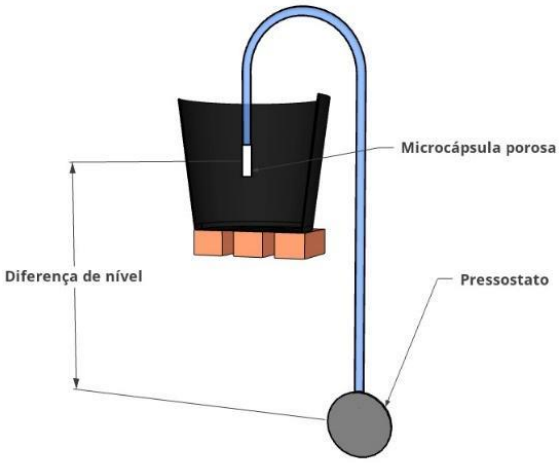


Figura 2. Detalhes construtivos e operacionais do acionador automático para irrigação (AAI).

O fator 2 foi caracterizado por doses de fertirrigação com ARB tratada biologicamente com microalgas da espécie Spirulina platenses, produzidas por inoculação em fotobiorreatores. Essas doses foram aplicadas em função das exigências nutricionais da cultura, análise nutricional do solo (substrato) e análise química da ARB. A partir disso foram determinadas as doses de 100, 75, 50 e 0 %, equivalendo a 32, 24, 16 e 0 mg N L^{-1} por planta. Esse processo de aplicação da fertirrigação totalizou 33,80 L de ARB tratada diluída e aplicada em 4 doses ao longo do desenvolvimento da cultura.

O comprimento da haste principal ou altura máxima da planta foi monitorado em intervalos regulares até o ponto de corte, quando as hastes atingiram o padrão comercial, correspondente à plena abertura do botão floral da haste principal. Neste momento foram então determinados os parâmetros fitotécnicos relacionados a comprimento da haste (altura), o diâmetro (DH) e a massa fresca (MF) das hastes florais, além do diâmetro da flor (DF). A Figura 3 ilustra o experimento em diferentes etapas fenológicas das plantas de cravo.

(a) (b)

Figura 3. Plantas de cravo no período de crescimento vegetativo (a) e na fase de floração (b).

Os dados foram tabulados e submetidos a análises estatística. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade foi verificada pelo teste de Bartlett, ambos considerando um nível de significância de 5%. Posteriormente, foi realizada uma análise de variância (Two-way ANOVA) para investigar as diferenças entre os tratamentos avaliados. Quando significativas, foram realizadas análises de regressão entre as variáveis independentes (níveis de irrigação e doses de fertilização à base de água residuária) e as variáveis avaliadas, com uso do software estatístico R.

3. Resultados

Nos primeiros 12 dias após transplantio, as mudas foram irrigadas de forma manual, sendo aplicados volumes correspondentes à evapotranspiração de referência, totalizando 0,348 L por planta. A partir de 07 de junho iniciou-se o manejo automatizado da irrigação (Figura 4), que apresentou 76 acionamentos, com um volume médio aplicado de 12,57 L por planta para o tratamento controle (V4), considerando as diferentes doses de fertirrigação. Os demais tratamentos do fator 1 receberam, em média, 7,86 (V1), 9,07 (V2) e 9,94 L (V3). A ETo média ao longo do ciclo experimental foi de 3,25 mm e o volume médio aplicado foi de 0,22 L por planta.

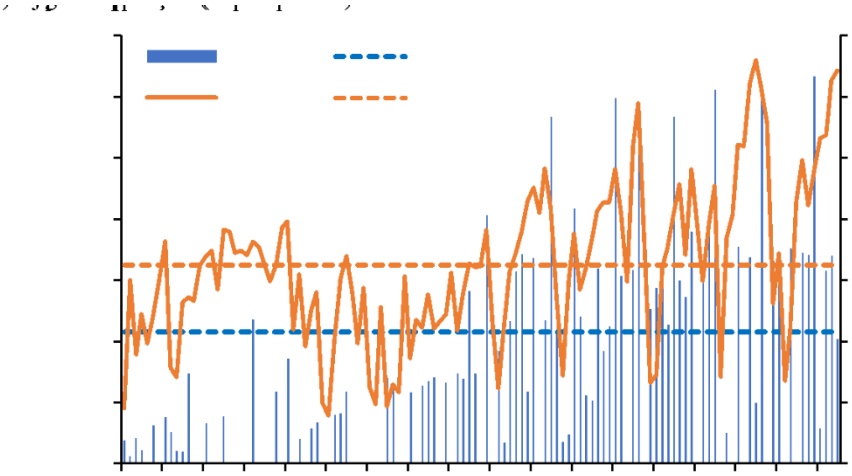


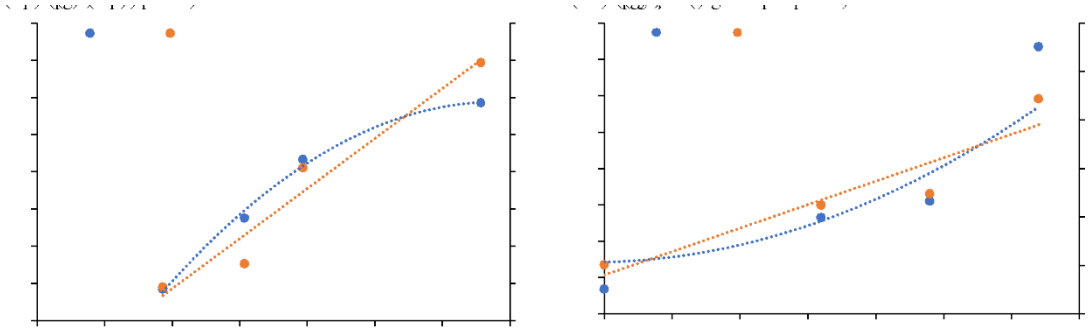
Figura 4. Volumes de água aplicados e evapotranspiração de referência (ETo) ao longo do experimento..

Houve efeito significativo dos fatores avaliados no comprimento da haste principal (altura) e na massa fresca das hastes (Figura 5). Foram ajustados modelos polinomiais para comprimento da haste principal (altura) e modelos lineares para massa fresca da haste floral. Por outro lado, o diâmetro das hastes florais bem como o diâmetro das flores de cravo não foram influenciados pela suplementação hídrica e doses de fertirrigação, e apresentaram valores que variaram, respectivamente, de 3,57 a 3,75 mm, e de 4,72 a 5,0 cm.

4. Discussão

O volume de água aplicado nos primeiros 12 dias de ciclo foi pequeno em função de uma ETo acumulada de 24,8 mm (2,1 mm dia^{-1}) (Figura 4). Os maiores volumes de água foram aplicados a partir do início do mês de agosto, com lâmina total de ETo até o final do ciclo de 229,2 mm. Antes dessa data, a ETo acumulada foi de 170,5 mm. Portanto, é possível constatar o aumento do volume de água aplicado e da frequencia de acionamento do sistema de irrigação em função do aumento da ETo e, consequentemente, da necessidade hídrica da cultura, quando as plantas estão mais desenvolvidas, com maior massa vegetal e demanda para florescimento.

As plantas ornamentais são valorizadas pelo seu aspecto estético e especificamente para flores de corte um dos principais parâmetros é a altura (comprimento) da haste floral, sendo que as hastes maiores são mais valorizadas no mercado [16].



(a) (b)

Figure 5. Variação dos valores de comprimento da haste principal (altura) e de massa fresca das hastes florais em resposta aos volumes (V) de água aplicados (a) e às doses (D) de fertirrigação (b).

O crescimento de plantas em altura e o acúmulo de biomassa é especialmente afetado pela adequada nutrição das plantas (Figura 5). A fertilização das plantas tem papel fundamental na determinação do tamanho das hastes florais, para flores de corte seja pela menor disponibilidade que leva à produção de flores de baixa qualidade, quanto pelo excesso de nutrientes que pode causar fitotoxidez [17].

No presente estudo, houve uma correlação positiva entre o aumento das doses aplicadas de água residuária de bovinocultura e o aumento do comprimento da haste floral e da biomassa produzida (Figura 5b), indicando que a água residuária na concentração em que se apresentava continha teores de nutrientes adequados para a planta. Estudos mostram que a fertirrigação com irrigação com água residuária em cultivos hortícolas mostrou-se efeitos positivos em devido ao aumento da disponibilidade de nutrientes, em especial o nitrogênio além de fósforo e potássio [18-19].

A maior restrição hídrica também afeta o crescimento da haste floral, em parte devido às condições ambientais estressantes, reduzindo a capacidade fotossintética o que leva à produção plantas e hastes florais de menores, como foi detectado para as culturas de zinia e gladíolo [20,10] (Figura 5a). Além disso, o estresse hídrico intenso provoca múltiplas respostas fisiológica em plantas de cravo causando levando à redução no crescimento vegetativo, do potencial hídrico foliar, do conteúdo relativo de água, a condutância estomática e a taxa de transpiração [14]. Vale ainda ressaltar que a disponibilidade de água no solo afeta diretamente a difusão de macro e micronutrientes [21], ou seja, para que os nutrientes estejam disponíveis para serem absorvidos e translocados pelas plantas é necessário a adequada irrigação do substrato de cultivo [22].

Esses resultados indicam que é possível a produção sustentável de cravos, utilizando água residuária de bovinocultura, como uma alternativa à fertilização

mineral. No entanto, é importante otimizar o manejo da irrigação das plantas para obter flores de alta qualidade. Diante disso, e com vistas a crescente demanda de produção de flores, esse trabalho sinaliza para a possibilidade da integração entre a floricultura e a pecuária que pode trazer soluções ambientalmente mais sustentáveis.

5. Conclusões

É possível concluir que o manejo eficiente da irrigação e uso de água residuária de bovinocultura tratada favorecem o crescimento das plantas de cravo de corte, gerando hastes florais de qualidade.

Contribuição dos Autores: Conceitualização, D.F.C., H.V.M e R.G.P.; metodologia, D.F.C., H.V.M e R.G.P.; validação, D.F.C., G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.; análise formal, D.F.C., G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.; investigação, G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.D.F.C. e M.D.S.R.; recursos, D.F.C.; curadoria de dados, D.F.C., G.A.S., L.M.S. e I.M.M.; redação — preparação do rascunho original, D.F.C., G.A.S., L.M.S., I.M.M. e R.G.P.; redação — revisão e edição, D.F.C. e R.G.P.; supervisão, D.F.C. e R.G.P.; administração do projeto, D.F.C.; aquisição de financiamento, D.F.C. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este trabalho é parte integrante do projeto “Reutilização de água para irrigação: produção de flores e de espécies arbóreas de Mata Atlântica utilizando acionamento automático, substrato com lodo de esgoto e água residuária tratada de bovinocultura”, financiado pela FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro) (E-26/200.388/2023 e E-26/210.155/2023) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (305919/2022-9).

Agradecimentos: Nós agradecemos à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, especialmente aos técnicos do Setor de Horticultura do Instituto de Agronomia, pelo apoio dispensado na condução deste trabalho.

Conflitos de interesse: Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

1. LALLAWMZUALI, R.; PAL, A. K. Efficacy of Eco-Friendly Biostimulants in Enhancing the Performance of Ornamental Crops: A Review. *Chem Sci Rev Lett* 2023, *12*, 145-152.
2. NAGIAL, K. S.; KUMAR, N.; PODDAR, A. A comprehensive analysis of institutional wastewater for irrigating ornamental plants. *Water Supply* 2024, *24*, 2830
3. BRAGA, M. B.; MAROUELLI, W. A.; LIMA, C .A. P. Reuso de água como fator na produção agrícola. In: Reuso de água na agricultura. Ed. Braga, M.B & Lima, C.E.P. Embrapa Hortaliças, Brasília-DF, 2014. 202 p.
4. LIMA, P. M.; MORAIS, M. F.; CONSTANTINO, M. A.; PAULO, P. L.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C. Environmental assessment of waste handling in rural Brazil: Improvements towards circular economy. *Clean Environ Syst.* 2021, *3*, 1-9.
5. COVA, A. M. W.; SANTOS, A. L.; SOUZA, M. G.; SILVA, L. L.; AZEVEDO NETO, A. D.; GHEY, H. G. Wastewater as a source of water and nutrients in the cultivation of ornamental sunflower. *GEAMA, Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology* 2021, *7*, 61-66.
6. MANTOVANI, J. R.; SILVEIRA, L. G; LANDGRAF, P. R. C.; SANTOS, A. R.; COSTA, B. S.. Phosphorus rates and use of cattle manure in potted gerbera cultivation. *Ornamental horticulture* 2017, *23*, 412-418.
7. AYDINSAKIR, K.; OZCELIK, A.; BUYUKTAS, D.; TUZEL, I. H. Quality Characteristics of Drip Irrigated Carnation (Dianthus caryophyllus L. cv. "Eilat") under Protected Conditions. *Acta Hortic*. 2009, *807*, 307-312.

8. UCAR, Y.; KAZAZ, S.; ASKIN, MA.; AYDINSAKIR, K.; KADAYIFCI, A.; SENYIGIT, U. Determination of irrigation water amount and interval for carnation (Dianthus caryophyllus L.) with pan evaporation method. *HortScience* 2011, *46*, 102– 107.
9. KAZAZ, S.; UCAR, Y.; ASKIN, M. A.; AYDINSAKIR, K; SENYIGIT, U.; KADAYIFCI, A. Effects of different irrigation regimes on yield and some quality parameters of carnation. *Scientific Research and Essays* 2010, *5*, 2921-2930.
10. MOREIRA, K. F. A.; PÊGO, R. G.; SCHULTZ, N.; MEDICI, L. O.; CARVALHO, D. F. Production, quality, and longevity of zinnia cultivated under silicate fertilization and water restriction. *Ciênc. Agrotec*. 2025, *49*, e021424.
11. THOMAS, S. L.; BINDHU, J. S.; PILLAI, S. P.; BEENA, R.; BIJU, J.; SARADA, S. Nutrient Dynamics and Moisture Distribution under Drip Irrigation System. *Journal of Experimental Agriculture International* 2024, *46*, 485-493.
12. WANG, M.; NI, C.; WANG, R.; ZHONG, L.; CHENG, Y.; BAO, M.; ZHANG, F. Variation in longevity of cut and in planta flowers of potted carnation varieties affected by their relationship with ethylene and water. *Ornamental Plant Research* 2023, *3*:2.
13. REUT, A.; UZYANBAEVA, L. Features of the water regime of some species of the genus Dianthus L. in the South-Ural Botanical Garden (Ufa). *BIO Web of Conferences* 2024, *128*, 00034.
14. ÁLVAREZ, S.; NAVARRO, A.; BAÑÓN, S.; SÁNCHEZ-BLANCO, M. J. Regulated deficit irrigation in potted Dianthus plants: Effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses. *Scientia Horticulturae* 2009, *122*, 579–585.
15. MEDICI, L. O.; ROCHA, H.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R.A. Automatic controller to water plants. *Scientia Agricola*, 2010, *67*, 727–730.
16. MARTINS, R. C. F.; PÊGO, R. G.; CRUZ, E. S.; ABREU, J. F. G.; CARVALHO, D. F. Production and quality of zinnia under different growing seasons and irrigation levels. *Ciência e Agrotecnologia* 2021, *45*, e033720.
17. FURTINI NETO, A. E.; BOLDRIN, K. V. F.; MATTSON, N. S. Nutrition and Quality in Ornamental Plants. *Ornamental Horticulture* 2015, *21*, 139-150.
18. SENA, C. C. R.; FERREIRA, A. A.; SILVA, V. C. R. Mudança dos atributos químicos do solo após aplicação de água. *Revista de Biotecnologia & Ciência* 2020, 9, 1-10.
19. OLIVEIRA, M. L. A.; PAZ, V. P. S.; GONÇALVES, K. S.; OLIVEIRA, G. X. S. Crescimento e produção de girassol ornamental irrigado com diferentes lâminas e diluições de água residuária. *Irriga* 2017, *22*, 204-219.
20. SANTOS, J. J. S.; PÊGO, R. G.; COUTO, B. R. M.; BUENO, M. M.; CARVALHO, D. F. Evaluation of water requirement, commercial quality, and yield response factor of gladiolus produced with automated irrigation in different growing periods. *Ciência e Agrotecnologia* 2020, *44*, e017220.
21. SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; COMERFOR, N. B. Diffusive fluxes of phosphorus, potassium and metallic microelements as affected by soil compaction. *COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS* 2018, *49*, 2369–2378.
22. CAMPOS, A. J. M.; MEDEIROS, S.; NACARATH, I R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. *Research, Society and Development* 2021, 10, e311101523155.

PARTE 7

TECNOLOGIA DAS ESTUFAS

TECNOLOGÍA DE INVERNADEROS

Índice

Cucumber seed germination (Cucumis Savitus L.) with full spectrum LED light (UV-Vis-IR) 875

A Scientific Perspective on Almería´s Agri-Food Innovation Model 885

Cultivo Protegido do Tomate Italiano em Sistema Orgânico 894

Cucumber seed germination (Cucumis Savitus L.) with full spectrum LED light (UV-Vis-IR)

Norma Ramírez[1], Jessica Araujo[2], Claudio Araujo[3*], José Alfredo Padilla[4] and Martin Laguna[5]

1 Tecnológico Nacional de México en Celaya; norma.ramirez@itcelaya.edu.mx

2 Tecnológico Nacional de México en Celaya; jessica.araujo@itcelaya.edu.mx

3 Tecnológico Nacional de México en Celaya; d2303002@itcelaya.edu.mx

4 Tecnológico Nacional de México en Celaya; jose.padilla@itcelaya.edu.mx

5 Tecnológico Nacional de México en Celaya; martin.laguna@itcelaya.edu.mx

* Correspondence: d2303002@itcelaya.edu.mx; Tel: 52-461-1204041.

Abstract: This study investigates the effect of full-spectrum LED light exposure (UV, visible, and infrared) on plants, focusing on the germination of cucumber (Cucumis sativus L.) seeds. Several studies were analyzed to compare the germination rate, germination speed, and vigor of seedlings exposed to full-spectrum LED light. The results indicate that this light significantly impacts germination rate and early seedling growth, suggesting its potential for applications in controlled agriculture and horticulture. In addition to this study, a germination chamber with LED lights was set up to evaluate its effect on cucumber seeds using a commercial LED light that covers the entire spectrum for germination. Its efficacy was verified with 98% germination over 13 days, with 12 hours of darkness and 12 hours with LED lights.

Keywords: Cucumis savitus; germination; Led; full spectrum.

1. Introduction

The current increase in the world's population is directly related to people's basic needs, among which food plays a fundamental role. Therefore, food production must grow and adapt to meet the demands of a world that continues to expand and develop. This highlights an aspect that has gained significant relevance in recent years: ecology. The search for new technologies in the food sector must focus on sustainable and environmentally friendly development (Pimentel et al., 2019).

Consequently, the goal is to produce more food with the least possible impact on the natural environment. This goal is only feasible through clean technologies, which are characterized by causing minimal or no damage to the environment where they are used. An essential characteristic of all living organisms is their ability to gather

"information" from the environment and activate physiological processes that optimize their performance based on the environmental conditions detected, thus maintaining homeostasis. For this reason, the use of electricity, magnetism, monochromatic light, and the application of sound as factors that stimulate plant growth have been investigated (Acosta-Santoyo et al., 2016, 2017; Morales et al., 2021; Pimentel et al., 2019).

Plants are sensitive to various stimuli and react to well-known environmental conditions, such as temperature, light quality, wavelength, humidity, and gravity. Furthermore, their ability to perceive and adapt to these factors is crucial for their growth, development, and survival. This adaptive behavior allows plants to optimize their physiological processes, maximize resource uptake, and improve their resilience to adverse conditions. It demonstrates a remarkable ability to adjust their biology in response to the changing environment.

Light plays a crucial role in plant growth and development, as it is an essential source of energy for photosynthesis (Ding et al., 2010). Plants respond to light intensity and color through photoreceptors such as phytochromes, cryptochromes, and phototropins, which are activated in response to specific wavelengths (Liu et al., 2012; Zhang & Folta, 2012). Phytochromes detect red and far-red light, regulating germination and flowering development processes. Cryptochromes are sensitive to blue and ultraviolet light, influencing stem elongation and circadian rhythm synchronization. Phototropins, which also respond to blue light, are involved in plant light orientation and growth regulation. These receptors allow plants to make precise adjustments in their development and adapt to diverse environmental conditions (Chen et al., 2020).

In recent times, LED lighting has emerged as a prominent alternative for plant cultivation (Massa et al., 2008), offering significant advantages such as precise control of spectral composition, compact size, the ability to produce high light levels with low heat radiation index, and a long lifespan that allows it to operate for years without replacement (Bourget, 2008; Dutta Gupta & Jatothu, 2013). Due to the importance of lighting systems in crop production in controlled environments (Paniagua Pardo et al., 2015), technological advances in this area are fundamental (Bourget, 2008).

LED technology is pivotal in shoot development by influencing plant physiology (Al Murad et al., 2021). Light quality, in terms of color and wavelength, significantly impacts photosynthesis and photomorphogenesis. The spectral composition of light, which encompasses different wavelengths such as blue, green, yellow, red, far-red, and invisible radiation such as UV and IR, is crucial for plant growth, shape,

development, and flowering (photomorphogenesis). In particular, the blue and red regions are essential for photosynthesis (Klem et al., 2019; Yavari et al., 2021). The quantity of light also directly affects this process, a photochemical reaction within the chloroplasts of plant cells, where CO2 is converted into carbohydrates under the influence of light energy. Adequate light exposure regulates crop maturity, accelerates the harvesting process, and thus reduces production costs and improves biological efficiency. In controlled production systems, providing specific wavelengths is essential to ensure high-quality commercial agricultural products (Alrifai et al., 2019).

Cucumber (Cucumis sativus L.), a member of the Cucurbitaceae family, is one of the most widely cultivated vegetables worldwide. Its fruits are an excellent source of minerals and vitamins (Abasolo-Pacheco et al., 2020; Chacón-padilla & Monge-pérez, 2020; Zazueta-Torres et al., 2022). Cucumber (Cucumis sativus L.) cultivation is influenced by various environmental factors, among which light plays an important role (Zazueta-Torres et al., 2022). LED lighting, which can be tuned to emit specific spectra, is gaining popularity in precision agriculture. However, the specific impact of full-spectrum LED light on germination and early growth of cucumber seeds has not yet been widely studied.

This study aims to evaluate the effect of exposure to full-spectrum UV-Vis-IR light-emitting diodes (LEDs) on the germination of cucumber (Cucumis sativus L.) seeds to determine their viability and potential benefits in controlled environments for the genetic improvement of this species.

2. Materials and Methods

A comprehensive review of multiple scientific publications examining full-spectrum LED lighting (300–800 nm) and its effects on various plants was conducted, focusing on cucumber (Cucumis sativus L.). Key parameters were evaluated, such as germination rate, the percentage of seeds germinating within a given period, and germination speed, measured in days from sowing to sprout emergence. Additionally, seedling vigor, assessed through stem length and seedling fresh mass, was considered. The analysis also reviewed LED light exposure time and how this factor influences the observed results. Therefore, the construction of the germination chamber is described below.

2.1 Design and construction of the plant tissue growth chamber.

For the germination of cucumber plant seeds, a chamber 58 cm high, 35 cm wide, and 35 cm deep was built, which was divided into two sections for the germination trays, a container for water made of wood and acrylic coatings in black and

transparent, in order to have optimal light reflection inside the chamber. In the upper part of the container, LED lights and a 360 camera were installed to monitor the leaf area, temperature, and humidity sensors. Figure 1 shows the diagram of the components of the plant tissue growth chamber [8].

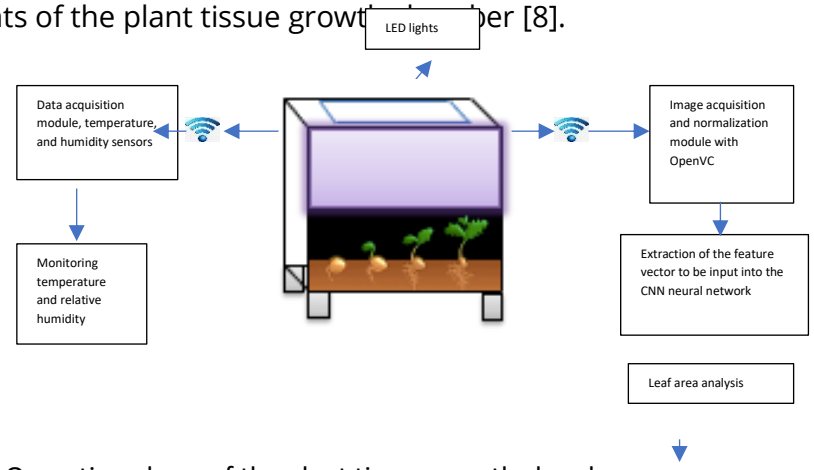


Figure 1. Operating phase of the plant tissue growth chamber.

2.2. Experimental Design

2.2.1 LED lights

In the LED lights chamber for seed germination, a plate of dimensions 25.2 x 25.2 x 2.95 cm was installed of lights for plant growth brand SoonHua, Model indoor growth, 312 Bled, SA2545, CBC004-537, with a voltage of 85V / 265V, with a power of 45 W, which is composed of a spectrum of 144 LEDs, 6 IR + 6 UV + 6 White 36 blue + 90 red. This light gives the entire spectrum that plants need for germination. When taking the luminance of the chamber during germination of the cucumber seed (Cucumis Savitus L), the following measurements were obtained, as shown in Table 1, with a Unit-T brand lux meter model UT381 / 382. According to the literature, a higher intensity is required during the plant's vegetative development than the flowering stage. To achieve an adequate objective, the vegetative stage values are between 200 and 500 lux, and during flowering, the range would be from 50 to 200 lux. Below is the luminosity measurement once the genuine leaf began to emerge from March 21 to April 1, 2024.

Table 1. Germination chamber light measurements over 11 days.

	MIN	MAX
Cucumber *(Cucumis Sativus L)*	266 x 10 lux	275 x 10 lux

3. Results

3.1 Germination test

American cucumber seeds (Cucumis Savitus, L) of the KRISTEN SEED PICKLE CAROLINA F1 class were sown in hydroponic agricultural sponges with STEINER brand APK nutrient solution. Germination inside the chamber was carried out within 48 hours of darkness. Then, the seedlings were maintained in periods of 12 hours of darkness and 12 hours of light for the 13 days that germination lasted until the seedling was obtained with an average height of 14 cm, as seen in Figure 2.

Figure 2. Germination process.

Compared with Gruda et al. in 2014, optimal germination of cucumber seeds was reported to occur under high humidity and controlled temperatures. The authors suggested a light cycle of 16 hours of light and 8 hours of darkness as the optimal time after the initial dark period. It differs slightly from the conditions described in the experiment, 12 hours of light and 12 hours of darkness.

3.2 Humidity and Temperature Measurement

To measure these variables, a temperature and humidity sensor was used to obtain data in real time. With IoT technology, they could be hosted in the cloud for monitoring through an Excel file (Figure 3[9]).

DateTime	Temperature(℃)	Humidity(%)
20240408	28.7	56
20240409	26.3	59
20240410	27.0	63
20240411	26.9	58
20240412	26.6	62
20240413	26.4	60
20240414	27.1	67
20240415	27.3	65
20240416	27.6	67
20240417	28.0	72

Figure 3. Temperature and humidity monitoring.

3.3 Image capture to calculate leaf area

To measure the diameter of the cotyledons, a 360 camera was installed to monitor in real-time and determine the maturity of the seedlings and then send them to the greenhouse where the rest of the stages of the plant phenology will be carried out. To carry out this process, Artificial Vision was used for the analysis of the images and subsequent processing with Deep Machine Learning through Convolutional Neural

Networks for the detection of the leaves and calculation of the area of the cotyledon leaf, considered the first non-true leaf that appears in germination. The following equation, 1, was used to calculate AH (Leaf Area). The length (L) is measured and multiplied by the width (A) of each leaf to determine the size of the cotyledon and begin to put the nutrient solution so that the first genuine leaf grows [10] [11].

$$AH = \frac{A}{L} \qquad (1)$$

A convolutional neural network (Figure 3) was implemented in Python, taking the pixels of the obtained images as input to generate the input vectors. The segmentation output was considered to determine whether it was suitable for applying APK nutrients.

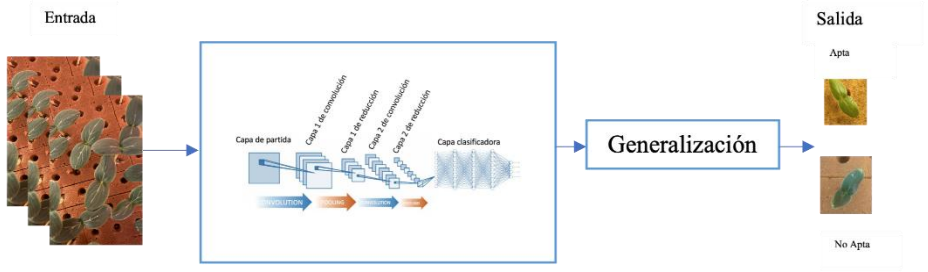


Figure 3. CNN neural network implementation model

4. Discussion

Electromagnetic radiation covers various wavelengths, each of which can specifically influence plant physiological processes. From the shortest wavelengths, which can be harmful, to the visible and near-infrared wavelengths crucial for plant development, the interaction between light and plants is a key area of study in plant physiology. Radiation is essential for photosynthesis in the visible spectrum region, which drives plant growth. As we move into the near-infrared (610–1000 nm), radiation contributes significantly to germination, leaf development, and flowering.

Recent studies have investigated how different light sources affect these processes, highlighting the combination of blue LEDs (455 nm, 4–16 µmol m–2 s–1) with HPS lamps (400–520 µmol m–2 s–1) in specific crops such as cucumber (Cucumis sativus L.). This combination has increased total plant biomass despite reducing fruit yield.

Hernández & Kubota (2016) evaluated cucumber seedlings' physiological and morphological responses to different proportions of blue and red-light using LEDs. The results showed that increasing blue light decreased hypocotyl length and leaf area while increasing chlorophyll content, photosynthetic rate, and stomatal conductance. Seedlings grew more under blue light and less under red light, contrary to expectations. The research suggests further study is needed to

determine the optimal light spectrum for horticultural crops under single-source LED lighting.

Hogewoning et al. (2010) showed that blue light is crucial for the normal photosynthetic functioning of cucumber leaves and their development, similar to how they do under high irradiance. Even a small percentage of blue light (7%) prevents photosynthetic dysfunction with red light alone. Increasing blue light up to 50% improves photosynthetic capacity, leaf mass, chlorophyll content, and stomatal conductance. Blue light allows plants to acclimate their leaves as if under high irradiance, which can be helpful to optimize cultivation under low irradiance conditions in growth facilities.

On the other hand, Zazueta-Torres et al. (2022) state that LEDs are an efficient light source for plant growth in limited spaces, but neither red nor blue light alone fully satisfies everyday growth needs. However, appropriate combinations of red and blue light (15-50% blue) result in optimal growth and development, increasing biomass, chlorophyll content, CO2 assimilation, and stomatal conductance. Using red light alone leads to a dysfunctional photosynthetic system in plants.

Moreno et al. (2017) evaluated the effect of LED light on serrano pepper seedlings. The results showed that red LED light favored stem growth, leaf width, and length, while blue and red LED light increased leaf number. Furthermore, blue light produced the highest content of photosynthetic pigments, such as chlorophyll and carotenoids. No significant differences in germination were observed between LED light treatments. It is concluded that red light is adequate for growth and blue light for photosynthetic pigment production.

According to Escobar Hernández (2023), light beneficially influences plant growth, especially in tomatoes and cucumbers, although reactions may differ between these two species. Essential results were observed when plants were growing under natural light and complementing it with LED light in different spectra (blue, red, and far-red). Cucumber plants increased lycopene content in their leaves, although other photosynthetic pigments decreased; red light caused more significant lycopene accumulation. The addition of light positively impacts physiological processes, plant growth, and development, as well as the antioxidant activity of tomato and cucumber fruits. However, the effects may vary depending on the species.

(Chen et al., 2020) examined how different light spectra affect the growth and development of in vitro-grown potato (Solanum tuberosum) seedlings, highlighting their impact on mini tuber production after transplanting. Various LED light spectra [red (RR), blue (BB), red + blue (RB), and red + blue + green (RBG)] were tested using

a total photosynthetic photon flux of 100 µmol m−2 s−1 for 4 weeks and compared with a fluorescent lamp. The RBG and RB spectra resulted in larger stem diameter, higher fresh and dry weight, and a higher health index. The all-blue spectrum induced the best stem diameter and high health index, improving root activity, soluble protein, and free amino acids. Improved leaf thickness and chloroplast structure were also observed with the BB and RBG spectra. After transplanting, following two months in the greenhouse, the BB, RB, and RBG spectra showed a high percentage of large tubers, although BB reduced the number of tubers per seedling. Overall, the blue and combined LED light spectra were more effective than fluorescent light for micropropagation of potato seedlings, with the RBG spectrum being the most suitable.

Klem et al. (2019) determined that light quality influences plant growth, development, physiology, and metabolism through photoreceptors and signaling pathways. This study investigated how UV-A, blue, red, and far-red light affects spring barley's morphological, physiological, and metabolic responses. The combination of red, blue, far-red, and UV-A light enhanced biomass growth and photosynthesis, while far-red light particularly stimulated root growth. Exposure to the entire light spectrum increases the accumulation of compounds that help tolerate stress, such as proline and antioxidant metabolites. It reduces the accumulation of abscisic acid associated with stress. Blue light induces the accumulation of γ-aminobutyric acid and other important secondary metabolites. Light quality is crucial for stress tolerance in plants. According to this discussion of several studies, we were able to determine that we obtained good results in the chamber with the LED lights in terms of germination time. Although commercial LED lights were used, we were able to verify that it is a chamber with a full spectrum because it contains blue and red LED lights that, according to Klem, 2019 improve the photosynthesis of the seeds; this favorably affects germination by obtaining 98% germination which is a significant rate.

5. Conclusions

In conclusion, exposure to full-spectrum LED light, encompassing UV, visible, and infrared light, significantly improves the germination rate, speed of germination, and vigor of cucumber (Cucumis sativus L.) seedlings. The results indicate that seeds exposed to this LED light exhibited a higher germination rate, faster germination rate, and greater seedling vigor, as evidenced by a notable increase in stem length and fresh mass.

Analysis by LED wavelength shows that predominant illumination at 660 nm, similar to direct sunlight, promotes normal growth. In comparison, illumination at 730 nm,

comparable to shade, induces longitudinal growth to escape the shade, resulting in taller plants but not necessarily greater biological mass.

These findings suggest that full-spectrum LED light positively affects germination and early seedling development. UV radiation could activate defense mechanisms and accelerate metabolic processes, while visible and infrared light promotes growth. This evidence highlights the potential of using full-spectrum LED light in agricultural production to optimize crop yield and quality, especially in controlled environments such as greenhouses and vertical farms, where light can be adjusted to maximize productivity.

References

1. Abasolo-Pacheco, F., Ojeda-Silvera, C. M., García-Gallirgos, V., Melgar-Valdes, C., Nuñez-Cerezo, K., & Mazón-Suástegui, J. M. (2020). Effect of homeopathic medicines during the initial stage and vegetative development of cucumber plants (Cucumis sativus L.). Terra Latinoamericana, 38(1), 165–180. https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.666/727
2. Acosta-Santoyo, G., Herrada, R. A., de Folter, S., & Bustos, E. (2016). Enhanced Germination and Growth of Arabidopsis thaliana Using IrO2-Ta2O5|Ti as a Dimensional Stable Anode in the Electro-Culture Technique. Geo-Chicago, Gurovich 2012, 33–41.
3. Acosta-Santoyo, G., Herrada, R. A., De Folter, S., & Bustos, E. (2017). Stimulation of the Germination and Growth of Different Plant Species Using an Electric Field Treatment with IrO2-Ta2O5|Ti electrodes. Journal of Organizational Behavior, 28(3), 303–325. https://doi.org/10.1002/j
4. Al Murad, M., Razi, K., Jeong, B. R., Samy, P. M. A., & Muneer, S. (2021). Light emitting diodes (Leds) as agricultural lighting: Impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. Sustainability (Switzerland), 13(4), 1–25. https://doi.org/10.3390/su13041985
5. Alrifai, O., Hao, X., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2019). Current Review of the Modulatory Effects of LED Lights on Photosynthesis of Secondary Metabolites and Future Perspectives of Microgreen Vegetables [Review-article]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67(22), 6075–6090. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819
6. Bourget, C. M. (2008). An Introduction to Light-emitting Diodes. HortScience, 43(7), 1944–1946. https://doi.org/10.1210/endo-22-6-693
7. Chacón-padilla, K., & Monge-pérez, J. E. (2020). Cucumber (Cucumis sativus L.) production under greenhouse conditions: comparison between cucumber types. Tecnología En Marcha, 33, 17–35. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-ProduccionDePepinoCucumisSativusLBajoInvernadero-7451366.pdf
8. Chen, L. li, Zhang, K., Gong, X. chen, Wang, H. ying, Gao, Y. hui, Wang, X. quan, Zeng, Z. hai, & Hu, Y. gao. (2020). Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse. Journal of Integrative Agriculture, 19(1), 108–119. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X
9. Ding, Y., He, S., Teixeira da Silva, J. A., Li, G., & Tanaka, M. (2010). Effects of a new light source (cold cathode fluorescent lamps) on the growth of tree peony plantlets in vitro. Scientia Horticulturae, 125(2), 167–169. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2010.03.019
10. Dutta Gupta, S., & Jatothu, B. (2013). Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis. Plant Biotechnology Reports, 7(3), 211–220. https://doi.org/10.1007/s11816-013-0277-0
11. Escobar Hernández, D. I. (2023). Impactos de la iluminación con LEDs en el crecimiento, calidad de fruto y compuestos antioxidantes en plantas de tomate y pepino [UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558907/
12. Gruda, N., Tanny, J. (2014). Protected Crops. In: Dixon, G., Aldous, D. (eds) Horticulture: Plants for People and Places, Volume 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8578-5_10

13. Hernández, R., & Kubota, C. (2016). Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. Environmental and Experimental Botany, 121, 66–74. https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2015.04.001
14. Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of Cucumis sativus grown under different combinations of red and blue light. Journal of Experimental Botany, 61(11), 3107–3117. https://doi.org/10.1093/jxb/erq132
15. Klem, K., Gargallo-Garriga, A., Rattanapichai, W., Oravec, M., Holub, P., Veselá, B., Sardans, J., Peñuelas, J., & Urban, O. (2019). Distinct Morphological, Physiological, and Biochemical Responses to Light Quality in Barley Leaves and Roots. Frontiers in Plant Science, 10(August), 1–19. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01026
16. Liu, J., Zhang, F., Zhou, J., Chen, F., Wang, B., & Xie, X. (2012). Phytochrome B control of total leaf area and stomatal density affects drought tolerance in rice. Plant Molecular Biology, 78(3), 289–300. https://doi.org/10.1007/s11103-011-9860-3
17. Massa, G. D., Kim, H. H., Wheeler, R. M., & Mitchell, C. A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. HortScience, 43(7), 1951–1956. https://doi.org/10.21273/hortsci.43.7.1951
18. Morales, C., Solís, S., Bacame, F. J., Reyes-Vidal, M. Y., Manríquez, J., & Bustos, E. (2021). Electrical stimulation of Cucumis sativus germination and growth using IrO2-Ta2O5|Ti anodes in Vertisol pelic. Applied Soil Ecology, 161, 103864. https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2020.103864
19. Moreno, A., Loza, S., & Ortiz, M. (2017). Efecto de luz LED sobre semillas de Capsicum annuum L. var. serrano. Biotecnología Vegetal, 17(3), 145–151. https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/552/1434
20. Paniagua Pardo, G., Hernández Aguilar, C., Rico Martínez, F., Domínguez Pacheco, F. A., Martínez Ortiz, E., & Martínez González, C. L. (2015). Efecto de la luz led de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (Brassica oleracea L.). Polibotánica, 0(40), 199–212. https://doi.org/10.18387/polibotanica.40.13
21. Pimentel, O., Acosta, G., Acuña, J., & Bustos, E. (2019). Germinación y crecimiento de Cucumis sativus aplicando un campo eléctrico empleando superficies modificadas con óxiddos de metales de transición. Avances En Ciencias e Ingeniería, 10(1), 41–55. http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/41
22. Yavari, N., Tripathi, R., Wu, B. Sen, MacPherson, S., Singh, J., & Lefsrud, M. (2021). The effect of light quality on plant physiology, photosynthetic, and stress response in Arabidopsis thaliana leaves. Plos One, 16(3 March), 1–19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247380
23. Zazueta-Torres, N. D., Yáñez-Juárez, M. G., Ayala Tafoya, F., Velázquez-Alcaraz, T. de J., López-Orona, C. A., & Díaz-Valdés, T. (2022). Calidad de luz de lámparas fluorescentes en el crecimiento de pepino y severidad de Oidium sp. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(6), 977–989. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i6.2800
24. Zhang, T., & Folta, K. M. (2012). Green light signaling and adaptive response. Plant Signaling and Behavior, 7(1). https://doi.org/10.4161/psb.7.1.18635

A Scientific Perspective on Almería´s Agri-Food Innovation Model

Diego Valera[1,*]

[1*] Universidad de Almería. Carretera de Sacramento, s/n. 04120 Almería (España); dvalera@ual.es

Abstract: The "Almería Model" is an outstanding example of agri-food transformation that has turned a semi-arid region into a leading global agricultural cluster, thanks to its innovation and sustainability. This intensive greenhouse production system has transformed Almería from one of the poorest provinces in Spain into a leader in fruit and vegetable exports in Europe, supplying over 500 million consumers with healthy products. With over 35,000 hectares of greenhouses, one of the highest concentrations in the world, Almería produces annually more than 3.8 million tons of food, generating an economic value of over 3.2 billion euros. Ninety-three percent of this production is achieved without chemical pesticides thanks to biological control, establishing the region as a model of agricultural sustainability. In response to climate change and the growing demand for food, Almería has proven that it is possible to increase productivity while simultaneously reducing environmental impact, excelling in water use efficiency and significantly lower energy consumption compared to greenhouses in northern Europe. This success extends beyond productivity, socioeconomically affecting by fostering the development of thousands of small farmers, equity, and job creation. Almería is emerging as an innovation lab for global agriculture, aligning with initiatives such as the European Green Deal and the Circular Economy Strategy, reaffirming the importance of sustainable agri-food production for the future of the planet.

Keywords: greenhouse; sustainability; Almería model.

1. Introduction

Almería, a semi-arid province in southeastern Spain, has emerged as a global leader in protected horticulture. Often cited as a paradigmatic example of agricultural innovation, the so-called “Almería Miracle” is grounded in decades of systemic transformation. From the 1950s onward, Almería transitioned from a marginal agricultural zone to one of the most productive and technologically advanced regions in Europe [1].

This transformation (Figure 1) has been enabled by the convergence of several critical factors: access to groundwater, innovations in greenhouse technology, a resilient and entrepreneurial farming community, the development of agricultural cooperatives, and strategic public-private collaboration. Today, Almería hosts one of the world’s densest concentration of greenhouses, covering over 35,177 hectares [2]

and producing more than 3.8 million tons of fruits and vegetables annually [3], with 70% destined for export.

Figure 1. Greenhouses in Almería (Spain).

These developments have led to far-reaching impacts not only in terms of food production and export capacity, but also in sustainable development, social equity, and environmental stewardship. As such, the Almería model has attracted global attention and serves as a benchmark for regions facing similar agro-ecological constraints.

This paper aims to provide an in-depth scientific analysis of the Almería model by applying a multidisciplinary lens. We explore the historical evolution of this system, its operational methodologies, quantitative performance indicators, and policy frameworks. The analysis focuses on how this model aligns with major global objectives such as the European Green Deal, the FAO's climate-smart agriculture guidelines, and the UN Sustainable Development Goals (SDGs).

2. Materials and Methods

The methodological approach employed in this study is based on an interdisciplinary synthesis of literature review, empirical data analysis, and qualitative case study methods. The primary sources include government policy documents (e.g., Spain's Circular Economy Strategy [4], the European Farm to Fork Strategy [5]), scientific literature on agronomic performance and sustainability metrics [1,6], and institutional reports from the University of Almería [7].

Empirical data were collected from peer-reviewed publications, agricultural statistics, cooperative records, and environmental impact assessments. Quantitative data points include crop yields, input usage (water, fertilizers, energy), greenhouse gas emissions, and socioeconomic indicators such as farm size distribution and income levels.

Building fundamentally on the extensive data collection carried out in our studies [6], both qualitative and quantitative data were extracted through two primary sources. First, a comprehensive 108-question survey was administered individually to each of the 212 participating farmers. Second, additional information was obtained from spreadsheets completed by the 18 agricultural product marketing companies involved in the study. Most of the farmers surveyed were affiliated with these 18 companies, which facilitated the comparison and validation of the data collected from both sources. Typically, each company connected the research team with approximately 10 of their associated farmers, and the surveys were conducted at the respective company headquarters. To enhance the representativeness of the sample and ensure broader validity, a control group of 48 independent farmers—those unaffiliated with the participating companies—was also included in the study [1,6].

The framework for this analysis draws on the principles of sustainable intensification, circular bioeconomy, and agroecological transition. Comparative benchmarks with other agricultural systems—namely Dutch high-tech greenhouses and extensive systems in North Africa—were used to contextualize Almería's performance.

The University of Almería's involvement in over 130 R&D projects, along with its numerous private-sector collaborations, also provided a robust dataset for understanding innovation uptake and technology transfer in the regional context [7].

3. Results

One of the most illuminating comparisons in agri-food systems is between Almería and the Netherlands. Both regions are leaders in greenhouse horticulture, yet they follow distinct models. The Dutch model emphasizes high technological inputs, including artificial lighting, heating, and full environmental control, supported by a highly industrialized infrastructure. In contrast, Almería's greenhouses rely on passive solar energy and natural ventilation, leading to vastly lower energy consumption and CO_2 emissions. Research shows that Dutch greenhouses can consume up to 22 times more energy per kilogram of tomatoes produced than Almería's unheated greenhouses [1]. Even when transport emissions are considered, Almería's environmental footprint remains significantly smaller, positioning it as a model for energy-efficient production.

Economically, while Dutch exports are driven by scale and logistics infrastructure, Almería's system is deeply rooted in cooperative economies and smallholder

empowerment. This structure creates a more equitable distribution of wealth and enhances social resilience. The social ownership model of Almería could offer insights for improving inclusivity in high-tech agri-food systems globally.

On the other hand, Almería's practices closely align with key European policy frameworks. The Green Deal [8] and Farm to Fork strategies [5] emphasize reduced chemical input use, enhanced biodiversity, and climate neutrality by 2050. Almería's near-total shift to biological pest control, high-efficiency irrigation, and circular bioeconomy principles embodies these ambitions in practical terms. The region's leadership in using desalinated seawater for agriculture also supports the EU's goals for sustainable water management under the Water Framework Directive [9]. Furthermore, Almería's integration of renewable energy in greenhouse operations aligns with the EU Renewable Energy Directive [10]. The Spanish government's Circular Economy Strategy complements these initiatives, aiming to halve food waste and boost material reuse in the agri-food sector. Almería's innovations in organic waste valorization and bioplastic research make it a fertile testing ground for these policy goals.

These convergences suggest that Almería is not merely compliant with future EU regulations—it is actively shaping them. As the EU seeks demonstrable models of sustainable territorial development, Almería provides a credible and operational case.

In another order, Education and knowledge dissemination are critical to sustaining innovation in agri-food systems. The University of Almería has played a pivotal role in training generations of agricultural engineers, agronomists, and environmental scientists. Through specialized degrees, international exchange programs, and industry partnerships, UAL has embedded research and innovation into the fabric of regional development. With more than 130 ongoing R&D projects, including EU-funded Horizon Europe collaborations, UAL's academic infrastructure supports fundamental and applied research in areas such as plant biotechnology, soil remediation, and digital farming [7]. Moreover, its strong emphasis on public-private partnerships ensures that research outputs are rapidly translated into practice. UAL also promotes entrepreneurship through its technology transfer office and incubator programs, encouraging students and researchers to commercialize their innovations. This ecosystem fosters a culture of continuous learning and adaptive expertise, which is essential in the face of climate and market uncertainties.

With respect to digitalization and smart technologies in greenhouse management, Almería has embraced the digital transformation of agriculture, positioning itself at the forefront of precision horticulture. Greenhouse operations increasingly rely on

data-driven decision-making supported by Internet of Things (IoT) sensors, remote monitoring platforms, and machine learning algorithms. These technologies enable real-time optimization of irrigation, fertigation, climate control, and pest management. One of the notable developments is the deployment of automated fertigation systems that adjust nutrient delivery based on plant growth stages and environmental conditions. Similarly, drones and multispectral imaging are used for early detection of plant stress and disease, reducing the need for preventive chemical applications.

Digital agriculture not only enhances efficiency but also allows for traceability and compliance with international food safety standards. By integrating blockchain technologies and cloud-based traceability platforms, Almería producers can offer transparency from seed to shelf, reinforcing consumer confidence and market competitiveness.

The region also benefits from strong institutional support for agri-digitalization, with the University of Almería and various technology hubs facilitating research, training, and startup incubation in smart farming technologies.

No less important is the international outreach and knowledge transfer. The "Almería Model" has become a reference point for agricultural development initiatives worldwide. Delegations from Asia, Africa, Latin America, and the Middle East regularly visit the region to study its integrated approach to intensive horticulture, water efficiency, and cooperative governance. Several cooperation projects led by Spanish institutions and international development agencies have adapted Almería's principles to countries facing water scarcity, food insecurity, and rural poverty. These projects often include technology transfer, training programs, and pilot greenhouse farms designed to replicate the core components of the Almería model.

Almería's influence extends to multilateral forums, where it contributes expertise on sustainable intensification, food security, and circular economy in agriculture. This international engagement reflects not only the export of produce, but the export of knowledge, tools, and institutional frameworks that empower global south regions to leapfrog toward sustainability. Such outreach also strengthens Almería's role in international diplomacy related to climate-smart agriculture, and builds soft power for Spain and the European Union in development cooperation and food systems transformation.

The circular economy has become a cornerstone of Almería's agricultural evolution. Organic waste generated from pruning, harvesting, and packaging processes is

increasingly redirected into compost, biochar, and bioenergy production. The valorization of these byproducts not only reduces environmental impacts but also creates new revenue streams for cooperatives and farmers.

Agro-industrial symbiosis is evident in how energy, water, and nutrients are recovered and reused across different stages of production. For example, wastewater from postharvest processing is treated and reused in fertigation, while residual plant biomass is converted into biofertilizers or substrates for mushroom cultivation. Research institutions in the region are also working on bioplastics derived from crop waste, which can be used for biodegradable greenhouse films and packaging. These innovations align with EU objectives on plastics reduction and waste minimization. The transition to a circular bioeconomy positions Almería as a flagship territory in demonstrating how agri-food systems can reduce dependency on external inputs, close resource loops, and enhance ecological resilience.

We must not lose sight of the future challenges and strategic opportunities. Despite its achievements, the Almería model faces several strategic challenges that could shape its evolution in the coming decades. These include increasing climate variability, soil salinization, urban pressure on agricultural land, rising input costs, and international competition from emerging economies with lower labor and environmental standards. To address these threats, the sector must invest in climate adaptation strategies, including salt-tolerant crop varieties, precision agronomy, and sustainable land-use planning. Expanding desalination capacity and improving brine management will also be essential as freshwater resources become more limited.

A major opportunity lies in the expansion of the bioeconomy, particularly in biopesticides, biofertilizers, and functional foods. Furthermore, the integration of artificial intelligence and robotics in greenhouse operations could mitigate labor shortages while enhancing productivity and consistency.

Policy support from regional, national, and European institutions will be critical in facilitating this transition. Continued investment in education, gender equity, and intergenerational renewal will also ensure the long-term viability of the agri-food ecosystem in Almería.

Finally, as a summary of the results, we can highlight the following aspects:

3.1 Technological Productivity

The greenhouse system in Almería has achieved a remarkable productivity rate. This far surpasses European standards and is achieved with relatively low energy inputs

thanks to optimal climatic conditions and innovative passive solar greenhouse designs. These structures require minimal external heating, reducing CO_2 emissions and lowering operational costs.

3.2 Environmental Performance

Almería's greenhouses act as net carbon sinks, fixing over 500,000 tons of CO_2 annually. Localized drip irrigation is used in 99.99% of greenhouses, resulting in water use efficiencies of up to 30 kg/m³. The integration of desalinated seawater—powered increasingly by solar photovoltaic systems—has further optimized water resources while improving crop yields.

3.3 Social and Economic Impacts

The agri-food sector in Almería supports approximately 100,000 jobs, directly and indirectly, and accounts for 7.6% of regional employment. Notably, 95% of farms are family-owned, with an average farm size of only 2.5 hectares. Cooperative organizations have facilitated inclusive governance structures, and nearly 50% of farm holdings report shared ownership between men and women.

3.4 Food Safety and Quality

More than 90% of production uses biological pest control, achieving "zero-residue" certification in many cases. Over 90% of producers are certified under GlobalGAP and UNE-EN standards. Pesticide residue levels are five times lower than the EU average, and nearly 100% of product samples tested fall within strict safety thresholds, ensuring high food quality and consumer trust.

4. Discussion

The Almería model presents a case study of how systemic innovation, when embedded in a favorable institutional and ecological framework, can catalyze regional transformation. Unlike many high-yield agricultural systems that depend on centralized corporate ownership or unsustainable input use, Almería has achieved high productivity while maintaining decentralized, family-owned farms.

One of the most critical elements is the region's cooperative structure, which enables smallholders to access technological innovations, marketing networks, and global export chains. These cooperatives also serve as key nodes for technical advisory services, quality control, and food traceability, strengthening both economic and regulatory resilience.

Another factor is the tight integration between research institutions—particularly the University of Almería—and the private sector. This has led to rapid diffusion of agricultural technologies such as biological pest control, high-efficiency irrigation, climate-adaptive crop varieties, and digital agriculture platforms.

Comparative analysis reveals that Almería's agricultural system emits far less CO_2 per kilogram of produce than comparable systems in northern Europe. While Dutch greenhouses rely heavily on heating systems and fossil fuels, Almería leverages solar radiation and natural ventilation. Even when transportation to consumer markets is considered, Almería's total environmental footprint remains significantly lower.

Water scarcity remains a structural constraint, yet the region has turned this challenge into an opportunity through its pioneering use of seawater desalination and digital water management. Almería's model offers vital lessons for other semi-arid and arid regions, including parts of North Africa, the Middle East, and Latin America.

Moreover, the model's alignment with EU strategies—such as the Green Deal, Farm to Fork, and Horizon Europe—demonstrates its compatibility with future policy trajectories. The capacity for rapid adaptation was exemplified during the COVID-19 pandemic, where Almería ensured uninterrupted food supply while complying with strict health protocols.

Despite its many strengths, the Almería model is not without challenges. Land use pressure, generational renewal, labor force and rights, adaptation to climate change, and international competition require ongoing attention. Nonetheless, its holistic integration of economic, ecological, and social dimensions renders it a resilient system capable of evolving with future demands.

5. Conclusions

The Almería agri-food model represents a powerful example of climate-smart, resource-efficient, and socially inclusive agriculture. Through sustained innovation and strategic cooperation between farmers, cooperatives, and research institutions, the region has established itself as a global reference in sustainable intensification.

Its achievements extend beyond productivity. Almería offers a replicable blueprint for transforming agricultural systems in regions facing water scarcity, land degradation, and socio-economic inequality. Key success factors include: (1) locally adapted greenhouse technologies, (2) decentralized land ownership, (3) cooperative governance, (4) knowledge-intensive farming practices, and (5) strong science-policy-business linkages.

As global agriculture transitions toward a new paradigm under the imperatives of climate change, biodiversity conservation, and food security, the Almería model provides empirical proof that producing more with less is not only feasible, but essential.

Future work should explore how the model can be adapted in different agro-ecological and institutional contexts. This includes refining tools for digital monitoring, enhancing circular bioeconomy strategies, and expanding the role of women and youth in agri-innovation systems.

Ultimately, Almería's experience reaffirms that sustainability is not a constraint on productivity, but rather its most strategic enabler.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The author declare no conflict of interest.

References

1. Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Molina, F.D.; López, A. *Greenhouse agriculture in Almería: A comprehensive techno-economic analysis*; Cajamar Caja Rural: Almería, Spain, 2016; 508 pp.
2. Tong, X.; Zhang, X.; Fensholt, R.; Jensen, P.R.D.; Li, S.; Larsen, M.N.; Reiner, F.; Tian, F.; Brandt, M. Global area boom for greenhouse cultivation revealed by satellite mapping. *Nature food* **2024**, *5*, 513-523.
3. Análisis de la campana hortofrutícola de Almería. Campaña 2023/2024. Available online: https://www.plataformatierra.es/mercados/informe-analisis-campana-hortofruticola-almeria-2024 (accessed on 5 April 2025).
4. España circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular. Available online: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532_mod_tcm30-509532.pdf (accessed on 5 April 2025).
5. Farm to Fork strategy. Available online: https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en (accessed on 5 April 2025).
6. Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Molina, F.D.; López, A.; Camacho, F. The greenhouses of Almería, Spain: technological analysis and profitability. *Acta Hortic.* **2017**, 219-226.
7. Memoria del Curso Académico 2023-2024. Available online: https://www.ual.es/universidad/memoria (accessed on 5 April 2025).
8. The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. Available online: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (accessed on 5 April 2025).
9. Aznar, J.A.; Belmonte, L.J.; Velasco, J.F.; Valera, D.L. Farmers´profiles and behaviours towards desalinated seawater for irrigation: Insights from South-east Spain. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *296,* 126568.
10. Renewable Energy Directive. Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (accessed on 5 April 2025).

Cultivo Protegido do Tomate Italiano em Sistema Orgânico

Fabrício Rossi [1*], Vinicius José de Oliveira Garcia [2], Filipe Pereira Giardini Bonfim [3], Santino Seabra Júnior [4], Victor Augusto Forti[5]

[1] Universidade de São Paulo/Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimento; fabricio.rossi@usp.br

[2] Universidade Federal de São Carlos/Centro de Ciências Agrárias; garciavinicius@estudante.ufscar.br

[3] Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" /Faculdade de Ciências Agronômicas; filipe.giardini@unesp.br

[4] Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" /Faculdade de Ciências Agronômicas; santino.seabra@unesp.br

[5] Universidade Federal de São Carlos/Centro de Ciências Agrárias; viaugu@ufscar.br

* Correspondente: fabricio.rossi@usp.br; Tel.: (55 19 3565-4189)

Resumo: O tomate destaca-se entre as hortaliças de fruto mais demandadas e consumidas no Brasil. O cultivo protegido, por apresentar um maior custo envolvido, em função do investimento na estufa e sua manutenção, demanda hortaliças de maior valor agregado, como é o caso do tomate, tipo italiano, em sistema orgânico. O objetivo do trabalho foi comparar dois ambientes de produção, a campo e em estufa, na produção de tomate, tipo italiano, sob sistema de cultivo orgânico, visando obter resultados de produtividade e economicidade dos sistemas. O experimento está localizado em Pirassununga-SP, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. A estufa e o campo experimental possuem as mesmas dimensões, 105 m² cada. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com dois tratamentos (ambientes de produção) e sete repetições. Cada parcela experimental continha onze plantas, das quais quatro foram consideradas parcelas úteis. Os dados biométricos, coletados semanalmente, e de produtividade apresentaram resultados favoráveis ao cultivo do em estufa, com produtividade quatro vezes maior para o tomateiro em estufa em relação ao campo.

Palavras-chave: *Solanun lycopersicum* L.; estufa; plasticultura.

1. Introdução

Produzir alimentos de forma sustentável é o objetivo principal dos sistemas orgânicos de produção, de base agroecológica. No entanto, os desafios são inúmeros, principalmente os relacionados às pragas e doenças no cultivo de hortaliças. Neste sentido, a tecnologia de produção em ambientes protegidos (estufa) minimiza riscos de condições ambientais adversas, as quais tem sido constante em função das mudanças climáticas. Aliado a isso, a estufa permite melhores condições de manejo nutricional e sanitário dos cultivos.

Dentre as hortaliças de fruto mais demandadas e consumidas no Brasil, destaca-se o tomate. Este tem produção voltada para o consumo *in natura* e para a indústria de processamento [1]. O Brasil é um dos dez maiores produtores globais desta cultura e, em 2024, alcançou uma produção de 3,8 milhões de toneladas, cultivados em uma área total de 54.500 ha, representando 2% da produção mundial [2].

A cultura do tomate possui uma elevada diversidade de grupos e cultivares registradas, em sua maioria, híbridos com alto potencial genético, o que configura alternativas ao consumidor final [3]. Além disso, o crescente foco em sustentabilidade, torna um desafio para os produtores de hortaliças, que em culturas como o tomate, demandam elevada quantidade de insumos. Em sistemas de cultivo orgânico, a tendência e ao mesmo tempo, o desafio, é manter a qualidade e produtividade, além de reduzir a necessidade de insumos para a produção de alimentos [4]. Este sistema vem ganhando força para atender as demandas de mercado, assim como, alinhar os interesses de consumidores e as necessidades dos produtores, visando uma agricultura com práticas mais sustentáveis.

E apesar dos desafios, como a fitossanidade e a produtividade neste sistema de cultivo, alternativas são bem-vindas para ajudar a contornar situações adversas na agricultura, como as mudanças climáticas, tornando possível produzir alimentos. Uma delas é através do cultivo protegido em estufas, que demonstra melhorias de rentabilidade, qualidade e padrão produtivo, além de uma maior proteção a fatores edafoclimáticos e pragas e doenças [5].

O presente estudo teve por objetivo comparar o desenvolvimento agronômico e produtividade da cultura do tomate, tipo italiano, em sistema orgânico através da avaliação em dois ambientes, campo aberto e estufa.

2. Material e Métodos

O presente trabalho foi realizado junto ao Centro de Pesquisa da Plasticultura (CEP). A área de pesquisa situa-se na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA–USP), em Pirassununga-SP (latitude 21º58´33’S e longitude 47º26´26’O), com uma altitude de 618 m, temperatura média anual de 21,5°C (Figura 1).

Figura 1. Vista aérea da área experimento do Centro de Pesquisa da Plasticultura (CEP), na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP).

O experimento foi conduzido durante seis meses, no ano de 2024. O cultivo protegido foi estabelecido em uma estufa geminada, de 14 m de largura x 15 m de comprimento, com pé direito de 4 m, coberta por plástico com filme difusor de luz de 150 µm e lateral com tela anti-afídeo. O cultivo a campo foi feito em área com as mesmas dimensões da estufa (14 m x 15 m). Cada ambiente utilizou 105 m² para cultivo, totalizando 210 m².

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), sendo dois ambientes de cultivo (estufa e campo), com sete repetições. As parcelas foram compostas por 11 plantas, espaçadas 0,60 m entre plantas e 0,90 m entre linhas, conduzidas em haste dupla, sendo as quatro centrais consideradas como parcela útil. Foi utilizada o tomate tipo italiana, cultivar *Grazianni*, de crescimento indeterminado. A instalação da cultura do tomate ocorreu no mês de julho de 2024, com o transplantio das mudas com 37 dias de desenvolvimento.

As avaliações do desenvolvimento do tomateiro foram realizadas em seis fases fenológicas, durante doze coletas semanais. As fases foram: I) Crescimento vegetativo (aos 11 Dias Após Transplantio – DAT e 18 DAT); II) início do florescimento (27 DAT e 34 DAT); III) plena floração (40 DAT e 48 DAT); IV) início do desenvolvimento de frutos (55 DAT e 63 DAT); V) amadurecimento de frutos (68 DAT e 76 DAT) e VI) frutos em ponto de colheita (84 DAT e 91 DAT) [6]. As avaliações levaram em consideração características agronômicas, além das produtivas. Foram feitas coletas das seguintes características: altura de plantas, número de folhas e diâmetro de caule [7]. A colheita para avaliar a produção se iniciou aos 83 dias após transplantio (DAT). Foram feitas cinco colheitas neste período do experimento (83 DAT, 97 DAT, 115 DAT, 137 DAT e 153 DAT), sendo determinadas as produtividades total e comercial.

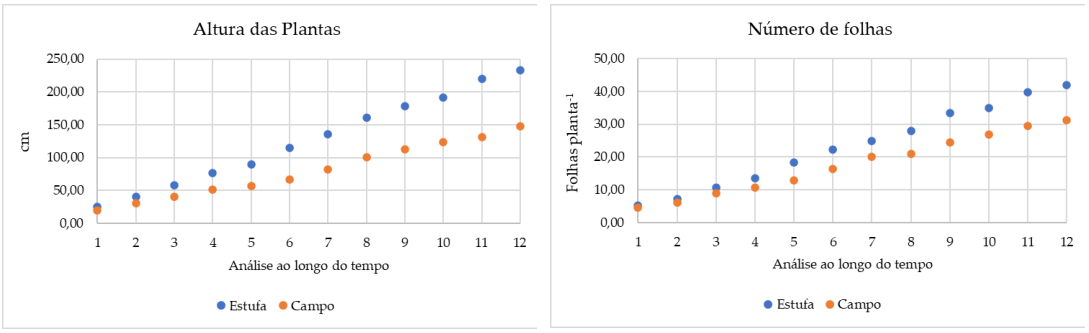
3. Resultados

3.1. Desenvolvimento agronômico

O desenvolvimento agronômico foi avaliado pela altura das plantas, número de folhas desenvolvidas e diâmetro do caule, analisados ao longo do tempo.

3.1.1 Altura de plantas e Número de folhas

Aos 91 dias após transplantio (DAT) as plantas apresentaram altura de 229,33 cm e 147,54 cm, e número médio de folhas por planta de 41,96 e 31,20, respectivamente na estufa e no campo (Figura 2).



(a) (b)

Figura 2. Altura das plantas (a) e número de folhas (b) do tomateiro, tipo italiano, ´Grazianni´, ao longo de 91 dias após transplantio, nos ambientes de cultivo estufa e campo. Tempo: (1) 11 DAT, (2) 18 DAT, (3) 27 DAT, (4) 34 DAT, (5) 40 DAT, (6) 48 DAT, (7) 55 DAT, (8) 63 DAT, (9) 68 DAT, (10) 76 DAT, (11) 84 DAT e (12) 91 DAT.

3.1.2 Diâmetro de caule

O diâmetro de caule, diferentemente da altura e do número de folhas, embora tenha mostrado superioridade de desenvolvimento para as plantas na estufa, a diferença mostrou-se constante a partir da 4ª avaliação, aos 34 DAT (Figura 3). Os diâmetros aos 91 DAT ficaram muito próximos, com 13,52 mm (estufa) e 13,34 mm (campo).

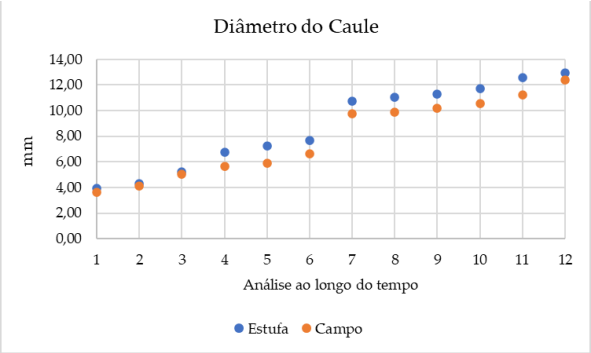


Figura 3. Diâmetro do caule do tomateiro, tipo italiano, ´Grazianni´, ao longo de 91 dias após transplantio, nos ambientes de cultivo estufa e campo. Tempo: (1) 11 DAT, (2) 18 DAT, (3) 27 DAT, (4) 34 DAT, (5) 40 DAT, (6) 48 DAT, (7) 55 DAT, (8) 63 DAT, (9) 68 DAT, (10) 76 DAT, (11) 84 DAT e (12) 91 DAT.

3.2. Produtividade

As produtividades, total (Figura 4a) e comercial (Figura 4b), por colheita, apresentaram resultados semelhantes, com a produtividade em estufa sendo superior à do campo. Nota-se uma diminuição da proporcionalidade do tomate produzido em campo em relação ao ambiente da estufa, ao longo do tempo (dias após transplantio – DAT).

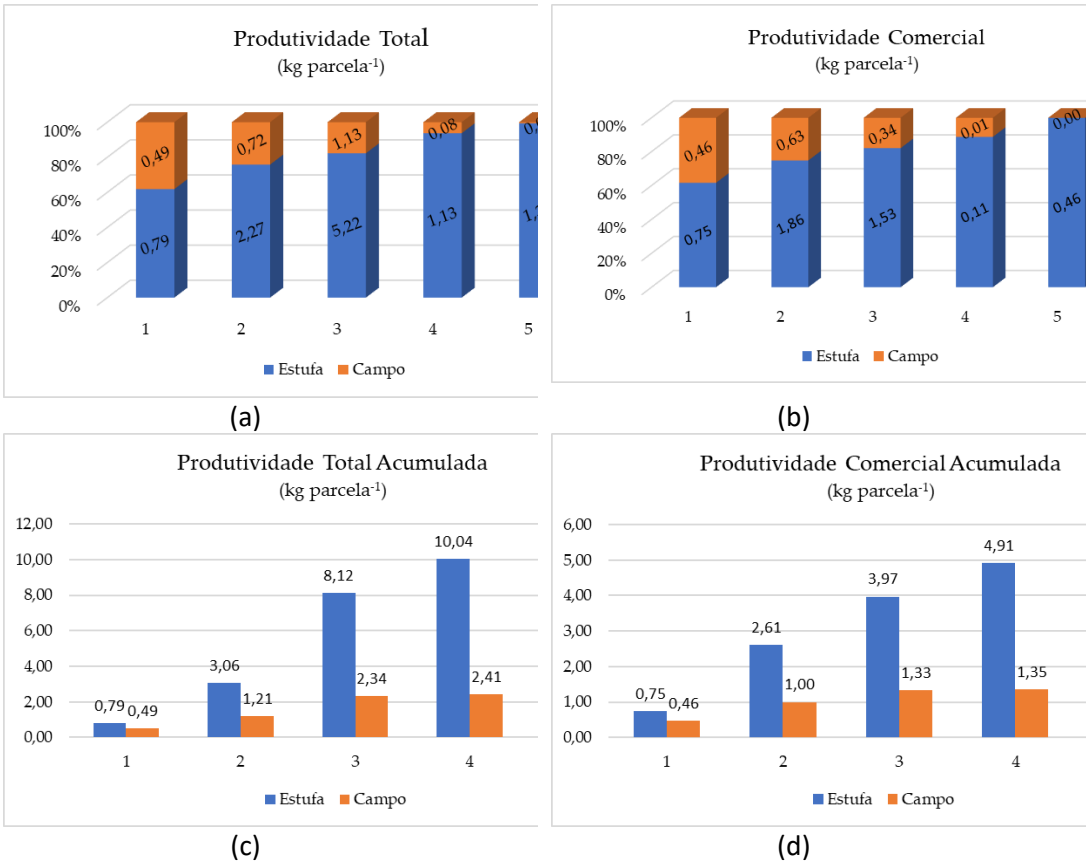


Figura 4. Produtividade total (a) e comercial (b), produtividade total acumulada (c) e produtividade comercial acumulada (d) do tomateiro, tipo italiano, ´Grazianni´, ao longo de 153 dias após transplantio, nos ambientes de cultivo estufa e campo. Tempo: (1) 83 DAT, (2) 97 DAT, (3) 115 DAT, (4) 137 DAT, (5) 153 DAT.

A análise da produtividade acumulada, ao longo do tempo, apresentou grande diferença entre os ambientes, estufa e campo, com produtividades maiores, total e comercial, para os tomateiros cultivados em estufa (Figuras 4c e 4d). Nota-se que na quinta colheita, aos 153 DAT não houve mais colheita dos tomates no campo, verificando-se que os valores acumulados não se alteraram da quarta colheita (137 DAT) para a quinta colheita (153 DAT) para produtividades total e comercial, acumuladas. A produtividade comercial acumulada para o ambiente estufa, aos 153 DAT, foi de 5,37 kg parcela^{-1} e do campo, foi 1,35 kg parcela^{-1}, ou seja, a produtividade comercial foi quatro vezes superior para os tomateiros cultivadas na estufa.

4. Discussão

O tomate, tipo italiano, ´Grazianni´ apresenta alta resistência a *Verticillium dahliae* (*Vd*), raça 1, *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici,* (*Fol*) raças 1, 2 e 3, *Tomato mosaic vírus* (*ToMV*) estirpe Tm1, com frutos com peso médio de 190 g [9]. Próximo aos 130 DAT houve uma infestação severa de mosca branca (*Bemisia tabaci*), o que influenciou significativamente a produtividade acumulada comercial a partir da quarta colheita. A aplicação de *Beauveria bassiana*, fungo entomatopatogênico recomendado para o controle da mosca branca, no nível de infestação apresentado, não foi eficiente em seu controle.

5. Conclusões

O cultivo protegido do tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.), do tipo italiano, em ambiente de estufa e sob manejo orgânico, constitui uma estratégia relevante para a redução de riscos relacionados à produção e à comercialização de frutos. Embora o ambiente protegido proporcione condições favoráveis ao desenvolvimento da cultura e contribua para a mitigação de pragas e doenças, sua eficácia é limitada, sendo necessário o emprego de estratégias complementares de manejo fitossanitário.

Destaca-se, ainda, a capacidade de resiliência do sistema orgânico, a qual tende a se intensificar ao longo do tempo em decorrência do incremento dos serviços ecossistêmicos associados à biodiversidade funcional. Nesse contexto, considerando que a área experimental vinculada ao Centro de Engenharia de Plasticultura iniciou recentemente a adoção do sistema orgânico de produção, são esperadas melhorias gradativas nos parâmetros produtivos, fundamentadas em práticas agroecológicas.

Adicionalmente, o monitoramento fitossanitário contínuo configura-se como uma prática indispensável para a eficácia do manejo integrado de pragas e doenças na cultura do tomateiro em sistemas orgânicos de cultivo protegido, sendo objetivo de outras pesquisas do grupo.

Contribuição dos autores: Conceitualização, F.R., F.P.G.B. e V.A.F; metodologia, F.R., F.P.G.B. e V.A.F.; validação, F.R., F.P.G.B. e V.A.F.; análise formal, F.R. e V.J.O.G; investigação, F.R e V.J.O.G.; curadoria de dados, F.R e V.J.O.G.; redação — preparação do rascunho original, F.R. e V.J.O.G; redação — revisão e edição, F.R.; supervisão, F.R. e V.A.F.; administração do projeto, F.R. e V.J.O.G.; aquisição de financiamento, F.R., F.P.G.B. e V.A.F.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela FAPESP/Brasken, processo nº 2021/05251-8. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), e Universidade Federal de São Carlos (UFSCar/CCA) e a Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp/FCA). Os autores também agradecem o financiamento do Centro de Engenharia da Plasticultura (CEP), FAPESP/Brasken e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. Cammarano, D.; Ronga; D., Mola; D., Mori; M., Parisi, M. Impact of climate change on water and nitrogen use efficiencies of processing tomato cultivated in Italy. *Agricultural Water Management*, **2020,** v. 241, 106336. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106336
2. Faostat, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Data-Dataset-Crops-National Production, 2024.
3. Nick, C.; Silva, D. J. H.; Borém, A. *Tomate: do plantio à colheita.* Viçosa: Ed. UFV, 2018. 237 p.
4. Silva, J. C.; Souto, H. N. Análise comparativa de germinação, crescimento e características visuais de alfaces (*Lactuca sativa*) cultivadas em sistema orgânico e convencional. *Revista GeTeC*, **2015**, v. 4, 26-33.
5. Araújo, H.F.; Leal, L.A.M.; Betin, P.S.; Nunes, E.F. Economic profitability indicators of minitomatoes organic production in greenhouses. *Horticultura Brasileira*, **2018**, v. 36, p. 246–252. https://doi.org/10.1590/S0102-053620180217
6. Ronga, D.; Zaccardelli, M.; Lovelli, S.; Perrone, D.; Francia, E.; Milc, J.; Ulrici, A.; Pecchioni, N. Biomass production and dry matter partitioning of processing tomato under organic vs conventional cropping systems in a Mediterranean environment. *Scientia Horticulturae*, **2017,** v. 224, p. 163–170. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.037
7. Caradonia, F.; Francia, E.; Alfano, V.; Ronga, D. Grafting and plant density influence tomato production in organic farming system. *Horticulturae*, **2023,** v. 9, p. 669. https://doi.org/10.3390/horticulturae9060669
8. Campagnol, R.; Mello, S.C.; Melo, P.C.T.; Minami, K. *Cultivo de minitomates em ambiente protegido.* Curitiba: SENAR-PR, 2016. 60 p.
9. Sakata. Tomate Grazianni. Disponível em: https://www.sakata.com.br/hortalicas/solanaceas/tomate/italiano-indeterminado/grazianni

PARTE 8

TECNOLOGIA DE PÓS-COLHEITA

TECNOLOGÍA POSTCOSECHA

Índice

Determination of Water Vapor Sorption Isotherms of Cannabis Inflorescence 903

Effect of soil composition on yield and accumulation of Cu, Hg, As and Pb in Solanum tuberosum L. grown in experimental pots with sulfide mine slag 916

Foliar biofortification with calcium in Solanum tuberosum L. cv. Rossi: effects on yield and mineral accumulation 928

Calcium enrichment in Rocha pears: Agronomic optimization and its effects on nutritional composition.....941

Análisis geométrico teórico de las cubiertas de los invernaderos Mediterráneos.....951

Determination of Water Vapor Sorption Isotherms of Cannabis Inflorescence

Alec R. Vista, Pabitra C. Das, Lope G. Tabil* and Oon-Doo Baik

[1] Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK CANADA S7V 5A9 (ARV: alec.vista@usask.ca; PCD: pcd476@mail.usask.ca; LGT: lope.tabil@usask.ca; ODB: oob411@mail.usask.ca)

* Correspondence: lope.tabil@usask.ca; Tel.:1(306) 966-5317; LGT

Abstract: Low-temperature drying is utilized for cannabis to preserve valuable secondary metabolites. The typical temperature in the drying room during hang-drying is 18-21°C, while the relative humidity is 50-55% and the drying time to final moisture content is about 5-6 days. The sorption isotherms of cannabis inflorescence were investigated at temperatures of 6℃, 10℃, 15℃, 20℃, and 25℃ under relative humidity of 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, and 80%. Standard sorption isotherm equations based on Modified Henderson, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) models were fitted to the sorption data. Within 30% to 80% relative humidity range, equilibrium moisture content (EMC) during adsorption at 6℃ (the lowest temperature) ranged from 14.69 to 21.55% dry basis, while during desorption, it ranged from 27.85 to 54.34% dry basis. At 25℃ (the highest temperature), the EMC during adsorption ranged from11.53 to 25.53% dry basis, while during desorption, it ranged from15.81 to 36.86%. Using non-linear regression methods, it was found that the Modified Halsey equation best describes the absorption behavior in the temperature range of 6℃-25℃. This study provides the foundation for further investigations into postharvest processing.

Keywords: Moisture sorption; cannabis postharvest; drying; rehydration; desorption; adsorption; isotherm model

1. Introduction

A basic understanding of agricultural materials begins with their structure, composition, and moisture content. Agricultural materials are mostly composed of water, which significantly impacts determining parameters such as market value and storage time [1]. Furthermore, understanding the structure, composition, and moisture of cannabis is fundamental to the basic understanding and will be the foundation of engineering design for large process operations such as drying, and packaging. Describing water movement during these postharvest processes begins with describing sorption isotherms in the operating conditions used for the process operations until storage.

Cannabis is an annual plant that is allogamous in nature, which means it dies off at the end of every season, producing seeds for the next season, producing seeds by pollinating a female and male flower. Drug type cannabis plants are only planted for their seeds and flowers, while fiber type plants are usually cultivated just before maturation [2]. The anatomy of cannabis anatomy plays a significant role in cannabis postharvest processes. Secondary metabolites such as phytocannabinoids and terpenes, are found in the highest concentration in epithelial membranes, in cannabis inflorescence, called trichomes. Currently, for medicinal, recreation and extraction purposes, only cannabis inflorescences and sugar leaves are utilized since trichomes are mostly found developing denser in these parts of female inflorescences [3, 4].

Moisture content and water activity are measures commonly used to evaluate the degree of drying in the cannabis industry [5, 6]. Moisture content describes the amount of both free and bound moisture in cannabis, while water activity is the amount of water available for microbial activity, thereby serving as a marker for the stability of food [7]. Drying is the process of removing water from biological materials to enhance storability [8, 9]. In the case of cannabis, proper moisture management prevents mold growth [10]. The reduction of moisture occurs through diffusion within the material and evaporation of moisture from its surface. Cannabis drying is initiated to remove excess moisture and achieve an acceptable water activity value. The optimal water activity range of 0.55-0.65 is generally considered safe to minimize mold risks in stored cannabis [5, 6]. Cannabis inflorescences then undergo the curing process, a climate-controlled stage where the cannabis inflorescence develops its optimal chemical profile while slowing the drying process. Since internal moisture remains bound inside, the inflorescence may appear to "gain" moisture. Potency, in terms of total THC and other cannabinoid content, depends solely on the genetic profile of the strain. However, improper postharvest processes, such as drying and curing, can prevent cannabis buds from reaching their optimum chemical composition.

Equilibrium moisture content (EMC) is the moisture present in biological materials at equilibrium with the surrounding environment. The relative humidity corresponding to these equilibrium conditions is called the equilibrium relative humidity (ERH). When plotted at constant temperatures, these values form the equilibrium moisture content curve [6]. Water activity (a_w) is derived from the chemical potential of water. Chemical potential measures how spontaneous a change from one state to another is. It depends on the concentration of a solute and a solvent, hydrostatic pressure, electrical potential, and gravity. For simplicity, only the solute and solvent concentrations are considered. The chemical potential (μ_1) of water is then given as:

$$\mu_1=\mu_o + RTln(a_w) \quad (1)$$

where, μ_o is an arbitrary standard state since the absolute chemical potential of a substance cannot be determined [1].

The main objective of this study was to obtain EMC data for cannabis inflorescence at different temperatures (6℃, 10℃, 15℃, 20℃, and 25℃) and relative humidities (30%, 40%, 50%, 60%, 70%, and 80%) and to evaluate which isotherm equations, namely, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB), best predicts the EMC of cannabis inflorescence.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material Source and Representative Sampling

The *Cannabis sativa* L. samples were provided by Bold Growth, Inc. (Saskatoon, SK Canada) and collected from June 2021 to September 2021. Representative sampling was done thoroughly, and samples were sourced from different areas of the drying room or curing bins following Standard Practice for Sampling of Cannabis/Hemp Post-Harvest Batches for Laboratory Analyses [11]. Ten gram samples were used in these trials as outlined by Bell and Labuza [12]. The number of inflorescences per 10 g samples varied from 3-6 inflorescence depending on their size. The amount of cannabis inflorescence used per replicate sample was consistent with isotherm determination investigations found in existing literature.

2.2. Moisture Content and Water Activity Measurement

The American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) ANSI/ASAE S358.3 Standard for Moisture Measurement of Forages was used to estimate the moisture content of cannabis [13]. A representative sample of at least 35 g was used for moisture analysis. Two representative samples were collected every 24 h, throughout the 5-7 days drying process. The samples were pre-weighed and recorded as the mass of the wet sample. The samples were then placed in a drying oven and left to dry for 5-8 h at 103℃. These drying conditions were chosen considering that cannabis contains volatile aromatic compounds such as terpenes. If mass measurements were not taken as soon as the drying process ended, an airtight desiccator was used.

The Aqualab 4TE (METER Group, Pullman, WA, United States), utilizing a chilled mirror dew point sensor to measure water activity at constant pressure and temperature was used for the measurement of water activity. Approximately 10 g of ground representative sample was tested. Data from this drying and curing

process were used to create moisture desorption isotherms using the fast isotherm method and were compared to a dynamic gravimetric method using a thin layer dryer.

2.3. Sorption Isotherm Determination

The environmental chamber (Espec, SH-641, Espec Corp., Osaka 530-8550, Japan) was used to create a controlled environment in which samples were placed in equilibrium, allowing a corresponding equilibrium moisture content to be measured to generate desorption isotherms for cannabis at different temperatures (6℃, 10℃, 15℃, 20℃, and 25℃) and relative humidity (30%, 40%, 50%, 60%, 70%, and 80%). These isotherms and were evaluated to determine which of the isotherm equations- Modified Henderson, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) equations- would be suitable for predicting the EMC of cannabis based on the ASAE D245.7 Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products [14].

2.4. Sorption Isotherm Models

To predict the EMC based on the measurements of ERH, isotherm equations are generated based on standardized equations. The ASABE Standards [15] summarized five isotherm equations for moisture relationships of plant-based agricultural products.

Modified Henderson equation

$$\mathrm{ERH} = 1 - \exp\left[-\mathrm{A}\ (\mathrm{T} + \mathrm{B})\ (\mathrm{MC_D})^{\mathrm{C}}\right] \quad (2)$$

Modified Chung-Pfost equation

$$\mathrm{ERH} = 1 - \exp\left[-\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{T}+\mathrm{B}}\exp(-\mathrm{C}\cdot\mathrm{MC_D})\right] \quad (3)$$

Modified Halsey equation

$$\mathrm{ERH} = \exp\left[-\frac{\exp(\mathrm{A}+\mathrm{B}\cdot\mathrm{T})}{(\mathrm{MC_D})^{\mathrm{C}}}\right] \quad (4)$$

Modified Oswin equation

$$\mathrm{ERH} = \left[\left(\frac{\mathrm{A}+\mathrm{B}\cdot\mathrm{T}}{\mathrm{MC_D}}\right)^{\mathrm{C}} + 1\right]^{-1} \quad (5)$$

Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) equation

$$EMC = \frac{A \cdot B\left(\frac{C}{T}\right)ERH}{(1-B\ ERH)[(1-B)ERH+\left(\frac{C}{T}\right) \cdot B \cdot ERH]} \quad (6)$$

where,

ERH = equilibrium relative humidity (decimal value, 0-1.0)

T = temperature (℃)

MC_D = dry-basis moisture content (decimal value)

A, B and C = equation constants and related data specifications based on which these constants were obtained and are summarized in Table 2 of ASABE Standards for Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products [15].

The five sorption isotherm models were each fitted to the data obtained from the sorption isotherm experiment, and coefficients A, B, and C were obtained, by maximizing the coefficient of determination (R^2) and minimizing the mean squared error (MSE) through Excel Solver.

3. Results and Discussion

3.1. Fitting Sorption Isotherm Models to the Data

The relationship between ERH and EMC (dry basis) is presented in Figures 1-5. There is clearly a positive correlation between ERH and EMC (dry basis) for cannabis at 6℃, 10℃, 15℃, 20℃, and 25℃. The five ASABE Standards for Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products moisture sorption isotherms models used for this analysis for cannabis are Modified Henderson, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) [15], that are given in equations 2-6, respectively.

A sigmoidal shape was observed for all the isotherms generated for 6℃, 10℃, 15℃, 20℃, and 25℃. The sigmoidal curves exhibit bending around 0.5-0.6 ERH, and a sharp incline begins from 0.6 and higher. Hysteresis is observed and becomes more pronounced as temperatures decreased and the effects of hysteresis decline as temperatures increased. For absorptive biological materials especially for food, it is known that the material adsorbing moisture will hold a less amount of water compared to the same material undergoing desorption, this phenomenon, called hysteresis, is observed in food and biological materials, as it describes the state of the component and its potential for physical and chemical changes [16]. The corresponding graph of the values of ERH and EMC after using the obtained coefficients, A, B, and C, are also overlayed on Figures 1-5.

Tables 1 and 2 are a summary of all the studied models, along with confidence intervals associated with the estimated constants A, B, and C, using non-linear regression methods for adsorption and desorption respectively. The best fit isotherm model for cannabis is determined to be the Modified Oswin model, based on a comparison of R^2 and MSE values with other isotherm models, where R^2 is closest to a value of 1 and MSE is minimized. Aside from the (GAB) model, all the other four isotherm models sufficiently describe the experimentally determined cannabis isotherm values, with R^2 values close enough to 1, and MSE values are closest to 0. The Modified Oswin (MO) model is highlighted, together with the desorption and adsorption experimental data in Figures 1-5, the solid blue line is the desorption isotherm, and the solid red line is the adsorption isotherm.

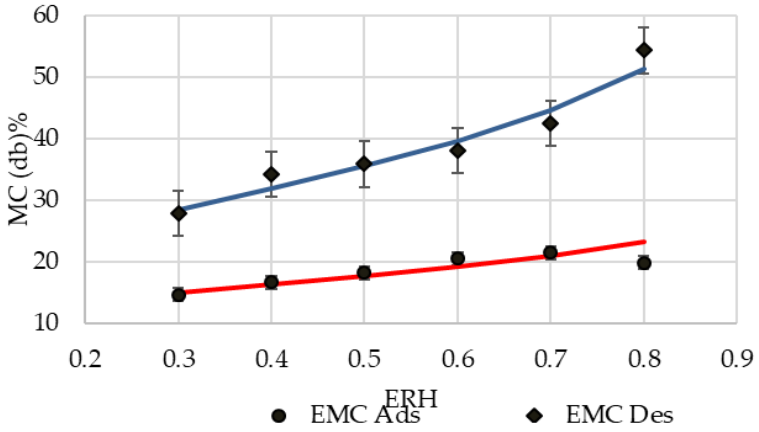


Figure 1. **Cannabis inflorescence sorption isotherm at temperature of 6℃.**

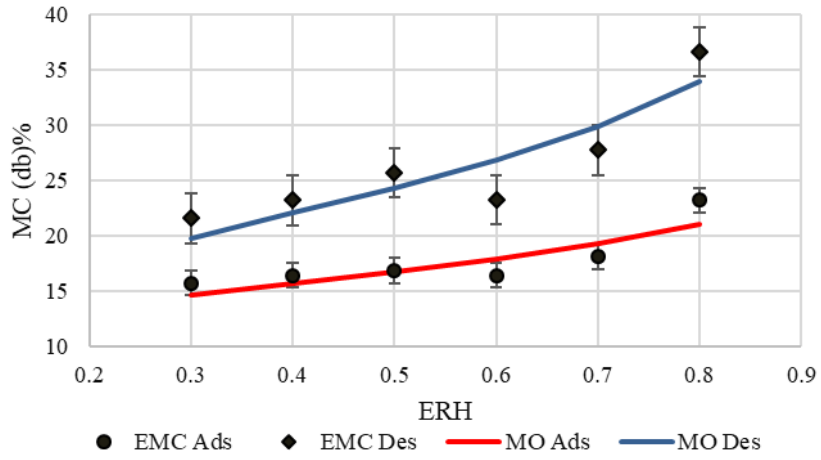


Figure 2. **Cannabis inflorescence sorption isotherms at temperature of 10℃.**

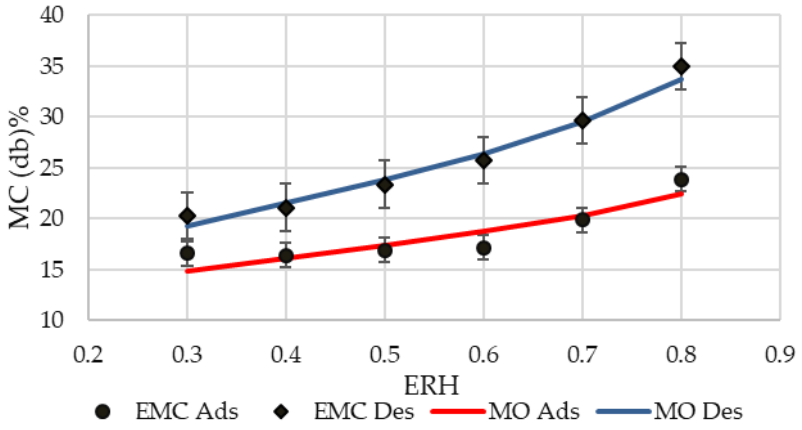


Figure 3. **Cannabis inflorescence sorption isotherms at temperature of 15℃.**

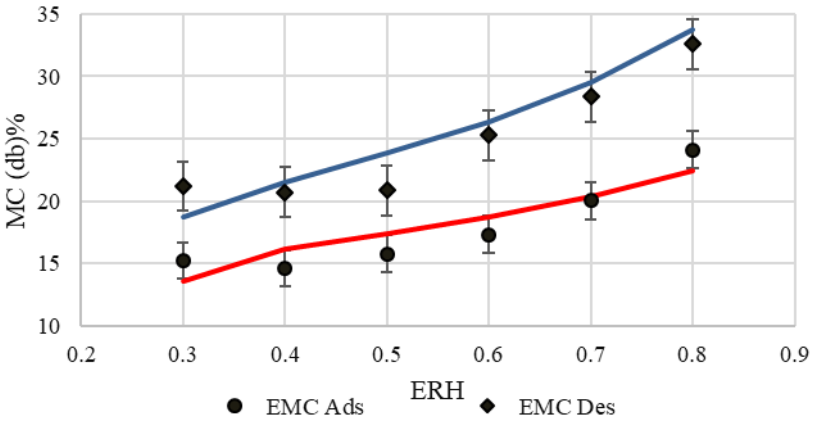


Figure 4. Cannabis inflorescence sorption isotherms at temperature of 20℃.

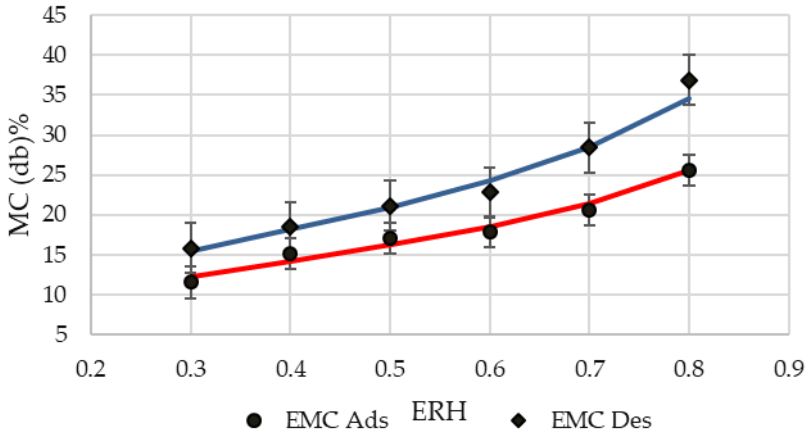


Figure 5. **Cannabis inflorescence sorption isotherms at temperature of 25℃.**

3.2. Effect of Temperature on Equilibrium Moisture Content

Compared to the existing ASAE D245.6 standard on moisture sorption isotherms, describing the movement of moisture should carefully differentiate adsorption and desorption isotherms, and specify whether the isotherm is applicable for the specific situation in which the biological material is handled [15, 17, 18]. This research

highlights the extensive differences of cannabis inflorescence EMC in desorption and adsorption isotherms and is proven by data summarized in Figures 1-5, visualized through the presence of the hysteresis phenomenon, or an observable gap and difference between adsorption and desorption isotherm curves, under the same temperatures.

Desorption data, Figure 6, will be more relevant for postharvest drying operations, as the harvested materials are dried from the maximum moisture capacity of cannabis inflorescence at harvest. For the case of storage and retail distribution of cannabis, the adsorption isotherms, summarized in Figure 7, will be more relevant, as these are typically dried and cured cannabis that could potentially re-adsorb moisture in differences in storage temperatures and ERH. Further, it is observed that as the temperature increases, the EMC decreases for both adsorption and desorption isotherms. A shift in the slope of adsorption isotherm is observed, as the temperature increases, the slope of the adsorption isotherm curve also increases. These slope differences appear to be most noticeable on ERH above 70% as seen in Figure 7. It is observable especially for adsorption isotherms, that there is a slight variance observed in the range of the slopes of the adsorption isotherm lines in Figure 7, which is noticeably different from the almost uniform slopes observed in the desorption isotherms in Figure 6.

Table 1. Adsorption isotherm model parameters.

		6°C	10°C	15°C	20°C	25°C
Modified Henderson	**A**	1.876E-5	2.215E-5	1.587E-5	2.066E-5	6.762E-5
	B	1.196	1.558	2.387	2.444	2.088
	C	2.974	2.789	2.724	2.600	2.112
	MSE	6.227E-3	9.576E-3	7.748E-3	3.920E-3	1.074E-3
	R^2	0.9997	0.9987	0.9984	0.9955	0.9926
Modified Chung-Pfost	**A**	157.4	715.2	715.6	719.8	107.1
	B	0.2019	0.2763	0.2260	0.1810	0.1301
	C	4.112E-1	-5.370E-8	5.303	32.00	-6.549
	MSE	5.665E-3	7.681E-3	6.259E-3	3.427E-3	1.020E-3
	R^2	0.9959	0.9817	0.9868	0.9853	0.9833
Modified Halsey	**A**	1.415	0.2482	0.1491	0.1251	0.1150
	B	1.403	1.410	0.8029	0.4375	0.2154
	C	3.562	5.221	4.404	3.304	2.118
	MSE	6.695E-3	6.796E-3	5.727E-3	3.036E-3	1.795E-3
	R^2	0.9866	0.9661	0.9760	0.9678	0.9415
Modified Oswin	**A**	1.627	1.506	1.475	1.459	1.452

	B	2.676	1.527	1.060	0.7526	0.5913
	C	5.013	6.161	5.405	4.242	3.040
	MSE	5.626E-3	7.684E-3	6.218E-3	3.298E-3	1.160E-3
	R^2	0.9962	0.9832	0.9858	0.9812	0.9695
GAB	**A**	27.78	12.41	12.55	10.90	9.890
	B	0.0194	0.5281	0.5565	0.6677	0.7613
	C	1.173E+3	9.752E+9	9.752E+9	9.752E+9	9.752E+9
	MSE	0.665	1.650	1.240	0.734	0.725
	R^2	0.9692	0.9880	0.9860	0.9754	0.9614

Drying agricultural biomass to bone dry, because of exposure to high temperatures, will result to the degradation of the structural conformities of the biomass, further reducing the capacity of the adsorption sites available for moisture to adsorb onto the surface of the cannabis inflorescence, thus the observable discrepancies to the range of slopes for adsorption isotherms at different temperatures in Figure 7 [19–21].

Table 2. **Desorption isotherm model parameters.**

		6℃	**10℃**	**15℃**	**20℃**	**25℃**
Modified Henderson	**A**	3.432E-5	3.807E-5	1.927E-5	2.331E-5	1.053E-4
	B	1.619	2.069	2.390	1.895	1.364
	C	2.200	2.291	2.381	2.294	1.799
	MSE	2.152E-3	7.613E-3	1.833E-03	4.394E-3	1.138E-3
	R^2	0.9932	0.9953	0.9969	0.9973	0.9884
Modified Chung-Pfost	**A**	63.18	128.8	129.3	129.9	128.4
	B	0.07424	0.1200	0.1178	0.1226	0.08941
	C	0.4254	2.281E-03	-3.836	-8.972	2.807
	MSE	1.530E-3	6.892E-3	7.805E-4	3.945E-3	8.885E-4
	R^2	0.9773	0.9820	0.9868	0.9905	0.9815
Modified Halsey	**A**	1.142	0.1891	0.1342	0.1278	0.1193
	B	1.373	0.9888	0.6095	0.4553	0.2332
	C	2.736	3.278	3.050	3.067	2.085
	MSE	1.552E-3	6.237E-3	3.676E-4	4.035E-3	2.704E-4
	R^2	0.9396	0.9581	0.9655	0.9787	0.9405
Modified Oswin	**A**	2.112	0.3297	1.432	1.412	1.400
	B	5.588	2.397	1.493	1.082	0.7830
	C	3.788	4.139	3.983	4.031	2.768
	MSE	1.391E-3	6.693E-3	6.598E-4	3.942E-3	4.778E-4

	R^2	0.9682	0.9765	0.9809	0.9873	0.9647
GAB	**A**	22.59	16.32	15.38	15.49	11.78
	B	0.7136	0.6538	0.6939	0.6480	0.8459
	C	7.936E+9	2.479E+9	2.479E+9	2.479E+9	2.479E+9
	MSE	3.410	4.891	0.2425	1.399	0.4198
	R^2	0.9693	0.9770	0.9721	0.9777	0.9422

3.3. Impact of Sorption Isotherms on Cannabis Postharvest Processes

The findings in this study clearly describe the moisture behavior of cannabis in postharvest processes, the industry postharvest drying endpoint, and predicts the possible behavior of cannabis' moisture content in storage in growing operations' storage sites. It also sheds some clarity on possible moisture losses in transport and storage in retail store environments.

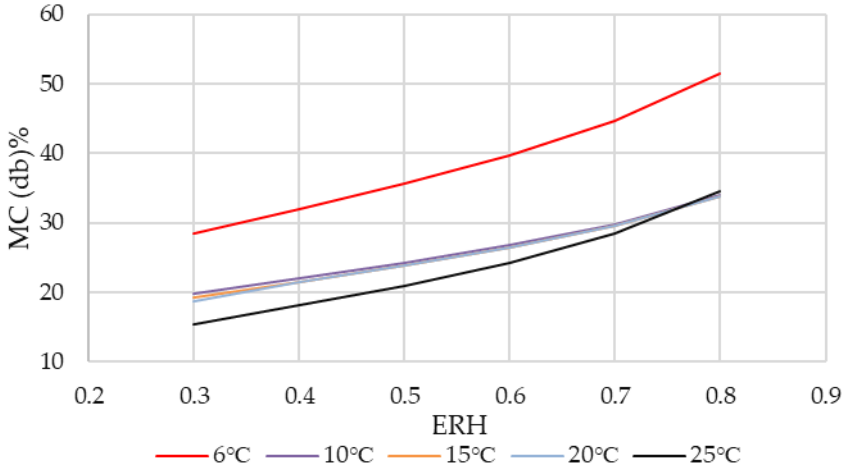


Figure 6. **Cannabis inflorescence desorption isotherms for modified Oswin equation as affected by temperature.**

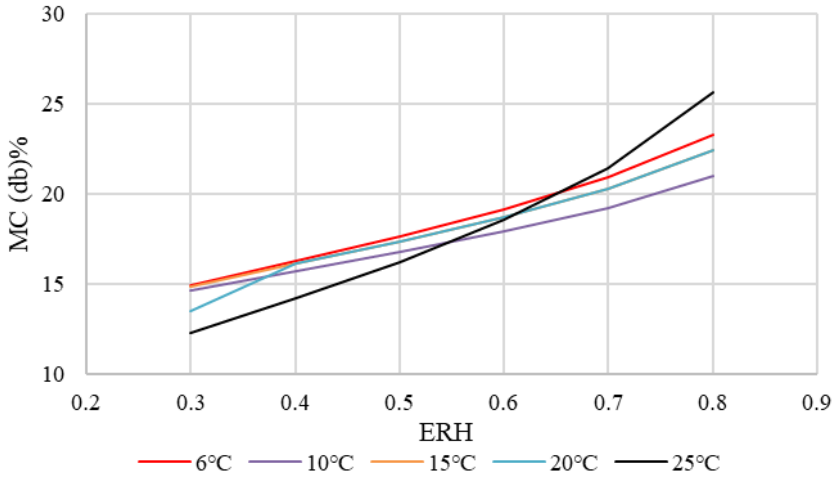


Figure 7. **Cannabis inflorescence adsorption isotherms for modified Oswin equation as affected by temperature.**

Postharvest process drying typically uses water activity meters to describe and get a glimpse of the moisture content of cannabis. The drying rate on the first 24 h exhibits biological materials' typical first falling rate period behavior with a steeper slope, as opposed to the next 24-48 h, which slowly tapers off [22]. It is observed that the moisture content stays constant at around 65% moisture content wet basis from 48 h to 120 h, while the water activity levels taper down. These findings highlight a potential false reading of the moisture content in cannabis at a non-equilibrium state in postharvest processes. For example, average environmental control values for drying found were 17.98℃, and 56.51% RH. Comparing these values to sorption isotherms for 20℃, it is found that at equilibrium, at 60% RH, the moisture content of cannabis is at around 25% dry basis or closer to 20% wet basis. This highlights the potential for cannabis inflorescence to continue losing moisture in storage and transport especially in non-environmentally controlled facilities. This will result to potential losses in revenue due to moisture losses from storage and transportation. Assuming for example, that a sample in a cannabis growing and processing facility was tested on the day of packaging at 50% moisture content dry basis, kept in environmentally controlled storage at 20℃ and 60% RH, it would have the potential to lose more moisture in the same environmental condition until it reaches its equilibrium isotherm value close to 25.27% moisture content dry basis. Further, if the same sample was shipped out to a non-environmentally controlled cube van with shifting temperatures, based on the data gathered, there is a potential for the cannabis inflorescence to lose more moisture to its environment, which would materialize in the form of condensation in its packaging material, which can promote mold growth, or loss of moisture to the environment if the packaging material is water vapor permeable [23, 24]. Losing significant moisture, and contamination due to the formation of mold from condensation during storage and transport will impact the quality, and eventually the revenue generated from cannabis inflorescence. The findings in this study are parallel with those reported for other porous biological materials [17, 18, 25, 26].

4. Conclusions

This study investigated the movement of moisture in cannabis postharvest processes, specifically focusing on the determination of cannabis inflorescence water vapor sorption isotherms. The EMC data were obtained for cannabis inflorescence at temperatures of 6℃, 10℃, 15℃, 20℃, and 25℃ and relative humidity values of 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, and 80% and the data collected were evaluated to determine which isotherm equations, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) equations, would be suitable for predicting the EMC of cannabis inflorescence. The sorption isotherms generated for the temperatures and ERH stated above are

summarized in Figures 1-5, and the isotherm curves can be generated using the constants A, B and C found in Tables 1 and 2.

Cannabis postharvest process optimization and improvements begin with foundational information such as moisture sorption isotherms. Cannabis moisture content at harvest averages at around 77.8% wet basis, at 56.5% RH and 18°C. Moisture sorption isotherms were determined for cannabis and the Modified Owsin is the model that was found to be most suitable. These isotherms will serve as a blueprint to understand the moisture relationships in cannabis from harvest until storage.

Author Contributions: Conceptualization, ARV, LGT; methodology, ARV, LGT; software, ARV.; validation, ARV, LGT and ODB; formal analysis, ARV, LGT; investigation, ARV; resources, LGT, ODB; data curation, LGT; writing—original draft preparation, ARV; writing—review and editing, ARV, PCD, LGT and ODB; visualization, ARV; supervision, LGT; project administration, LGT; funding acquisition, LGT. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada CREATE Grant (CREATE/543319–2020) through the project titled Quality Assurance and Quality Control for Cannabis (QAQCC) and Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada Discovery Grant (RGPIN-2017-05287 and RGPIN-2023-03940) of Lope G. Tabil.

Institutional Review Board Statement: Not applicable

Informed Consent Statement: Not applicable

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are available upon request from the corresponding author.

Acknowledgments: We acknowledge the internship support for Alec R. Vista by BOLD Growth, Inc. as well as the materials provided by them for this investigation.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Stroshine, R. *Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products*; Purdue University, West Lafayette, 1998.
2. Crini, G.; Lichtfouse, E.; Chanet, G.; Morin-Crini, N. Applications of Hemp in Textiles, Paper Industry, Insulation and Building Materials, Horticulture, Animal Nutrition, Food and Beverages, Nutraceuticals, Cosmetics and Hygiene, Medicine, Agrochemistry, Energy Production and Environment: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **2020**, *18* (1), 1451–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01029-2.
3. Hazekamp, A. Cannabis: Extracting the Medicine, PrintPartners Ipskamp: Amsterdam, 2007.
4. Jin, D.; Jin, S.; Chen, J. Cannabis Indoor Growing Conditions, Management Practices, and Post-Harvest Treatment: A Review. *American Journal of Plant Sciences*, **2019**, *10* (6), 925–946. https://doi.org/10.4236/ajps.2019.106067.
5. Challa, S. K. R.; Misra, N. N.; Martynenko, A. Drying of Cannabis—State of the Practices and Future Needs. *Drying Technology*, **2020**, 1–10. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1752230.
6. Das, P. C.; Vista, A. R.; Tabil, L. G.; Baik, O.-D. Postharvest Operations of Cannabis and Their Effect on Cannabinoid Content: A Review. *Bioengineering (Basel)*, **2022**, *9* (8), 364. https://doi.org/10.3390/bioengineering9080364.
7. Addo, P. W.; Chauvin-Bossé, T.; Taylor, N.; MacPherson, S.; Paris, M.; Lefsrud, M. Freeze-Drying *Cannabis Sativa* L. Using Real-Time Relative Humidity Monitoring and Mathematical Modeling for the Cannabis Industry. *Industrial Crops and Products*, **2023**, *199*, 116754. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116754.

8. Mohapatra, D.; Kumar, S.; Kotwaliwale, N.; Singh, K. K. Critical Factors Responsible for Fungi Growth in Stored Food Grains and Non-Chemical Approaches for Their Control. *Industrial Crops and Products*, **2017**, *108*, 162–182. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.039.
9. Tabil, L.; Sokhansanj, S. Mechanical and Temperature Effects on Shelf Life Stability of Fruits and Vegetables. In *Food Shelf Life Stability*; CRC Press Inc.: FL, **2000**; pp 37–86.
10. Majumdar, C. G.; ElSohly, M. A.; Ibrahim, E. A.; Elhendawy, M. A.; Stanford, D.; Chandra, S.; Wanas, A. S.; Radwan, M. M. Effect of Gamma Irradiation on Cannabinoid, Terpene, and Moisture Content of Cannabis Biomass. *Molecules*, **2023**, *28* (23), 7710. https://doi.org/10.3390/molecules28237710.
11. ASTM International. *Standard Practice for Sampling of Cannabis/Hemp Post-Harvest Batches for Laboratory Analyses*; ASTM International: West Conshohocken, PA, **2020**.
12. Bell, L. N.; Labuza, T. P. *Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*, 2nd ed.; American Association of Cereal Chemists: St. Paul, MN, **2000**.
13. ASABE Standards. ASAE S358.3 Moisture Measurement — Forages, **2021**.
14. ASABE. *ASAE D245.7 News Release*; **2024**. Retrieved December 17, 2024, from https://asabe.org/LinkClick.aspx?fileticket=UiJVLnZ5Suw%3D&portalid=0.
15. ASABE Standards. ASAE D245.6 Moisture Relationships of Plant-Based Agricultural Products, **2021**.
16. Caurie, M. Hysteresis in Foods. In *Encyclopedia of Agrophysics*; Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, **2011**; pp 384–384. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_71.
17. Andrade P., R. D.; Lemus M., R.; Pérez C., C. E. Models of Sorption Isotherms for Food: Uses and Limitations. *Vitae*, **2011**, *18* (3).
18. Aviara, N. A. *Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products*; IntechOpen, **2020**. https://doi.org/10.5772/intechopen.87996.
19. Akowuah, J. O.; Maier, D.; Opit, G.; McNeill, S.; Amstrong, P.; Campabadal, C.; Ambrose, K.; Obeng-Akrofi, G. Drying Temperature Effect on Kernel Damage and Viability of Maize Dried in a Solar Biomass Hybrid Dryer. *Open Journal of Applied Sciences*, **2018**, *8* (11), 506–517. https://doi.org/10.4236/ojapps.2018.811041.
20. Bai, J.; Kang, Y.; Chen, M.; Chen, Z.; You, L.; Li, X.; Chen, G. Impact of Surface Chemistry and Pore Structure on Water Vapor Adsorption Behavior in Gas Shale. *Chemical Engineering Journal*, **2020**, *402*, 126238. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126238.
21. Brennan, J. K.; Thomson, K. T.; Gubbins, K. E. Adsorption of Water in Activated Carbons: Effects of Pore Blocking and Connectivity. *Langmuir*, **2002**, *18* (14), 5438–5447. https://doi.org/10.1021/la0118560.
22. Belhamri, A. Characterization of the First Falling Rate Period During Drying of a Porous Material. *Drying Technology*, **2003**, *21* (7), 1235–1252. https://doi.org/10.1081/DRT-120023178.
23. Long, J.; Zhang, W.; Zhao, M.; Ruan, C.-Q. The Reduce of Water Vapor Permeability of Polysaccharide-Based Films in Food Packaging: A Comprehensive Review. *Carbohydrate polymers*, **2023**, *321*, 121267–121267. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121267.
24. Turan, D. Water Vapor Transport Properties of Polyurethane Films for Packaging of Respiring Foods. *Food Eng Rev*, **2021**, *13* (1), 54–65. https://doi.org/10.1007/s12393-019-09205-z.
25. Al-Muhtaseb, A. H.; McMinn, W. A. M.; Magee, T. R. A. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **2002**, *80*, 11.
26. Punja, Z. K. The Diverse Mycoflora Present on Dried Cannabis (*Cannabis Sativa* L., Marijuana) Inflorescences in Commercial Production. *Canadian Journal of Plant Pathology*, **2020**, 1–13. https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1758959.

Effect of soil composition on yield and accumulation of Cu, Hg, As and Pb in *Solanum tuberosum* L. grown in experimental pots with sulfide mine slag

Ana Rita F. Coelho[1,2*], Manuela Simões[1,2], José Almeida[1,2], Joaquim Cawina[1], Ana Coelho Marques[1,2], Cláudia C. Pessoa[1,2], Diana Daccak[1,2], Inês Luís[1,2], Maria M. Silva[1,2], Fernando H. Reboredo[1,2], Fernando C. Lidon[1,2]

[1] Earth Sciences Department of NOVA School of Sciences and Technology, Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; arf.coelho@fct.unl.pt; mmsr@fct.unl.pt; ja@fct.unl.pt; amc.marques@campus.fct.unl.pt; c.pessoa@fct.unl.pt; d.daccak@campus.fct.unl.pt; idc.rodrigues@campus.fct.unl.pt; mma.silva@fct.unl.pt; fhr@fct.unl.pt; fjl@fct.unl.pt;

[2] GeoBioTec Research Center, NOVA University Lisbon, 2829-516 Caparica, Portugal;

* Correspondence: arf.coelho@fct.unl.pt

Abstract: Considering food safety principles, an experimental trial was designed with the aim of evaluating the accumulation of heavy metals (Cu, Hg, As, and Pb) in tubers of three *S. tuberosum* L. cultivars (Agria, Désirée, and Red Lady) grown in contaminated substrates. The experiment consisted of cultivating in 27 experimental plastic pots with a 10-liter capacity, using SIRO HORTA substrate mixed with slag from an old polymetallic sulfide mine (Mina da Caveira) in four proportions: 10:0, 10:1 (500 mL of slag), 10:2 (1000 mL of slag), and 10:3 (1500 mL of slag). The substrates were characterized in the laboratory before and after harvest, with physical and chemical parameters analyzed, such as pH, electrical conductivity (by selective electrode method), and concentrations of Cu, Hg, As, and Pb (by X-ray fluorescence spectrophotometry). After harvest, the concentration of heavy metals (Cu, Hg, As, and Pb) in the tubers produced were quantified using X-ray fluorescence spectrophotometry, and productivity in terms of weight and number of tubers per pot and per cultivar was assessed. The results showed that Cu content varied between 17.3 and 32 mg/kg, Pb between 5 and 27.6 mg/kg, and As between 4 and 14.8 mg/kg. Tubers from the Désirée cultivar accumulated more Pb, while Agria tubers accumulated less As and Pb. Most tubers exceeded the maximum allowable limits for Pb and As according to European Commission regulations. Hg levels were found to be below the detection limit (<5 mg/kg). It was concluded that substrates with high concentrations of heavy metals promoted greater tuber production, possibly due to an adaptive response of the plants during their growth and development. This study also emphasizes the need to implement proper agricultural practices to ensure the food and nutritional safety of consumers, especially in potato production in areas with agricultural soils that have high levels of heavy metals.

Keywords: Potato; Caveira mine; contaminated soils; food security; Agria; Désirée; Red Lady

1. Introduction

Food safety is an important aspect of agricultural practices, especially when considering the accumulation of heavy metals in food. Heavy metal contamination in soils, especially for agricultural poses, is growing concern around the world, as metals such as Cu, Hg, As and Pb pose a significant risk to human health [1]. Heavy metals are non-biodegradable, therefore, they accumulate in the environment and subsequently enter the food chain [2]. Consequently, the accumulation of these metals in edible plant tissues of agronomic crops is a direct pathway for human exposure (through the food chain) [3], especially in a staple food crop like potatoes, which is considered the third most important food crop in terms of consumption worldwide [4].

Nevertheless, heavy metal uptake into food sources is influenced by different factors, including their concentration in the soil, the ability of the plants to take up and accumulate heavy metals within the different tissues in the same plant, or even the environment conditions [1,2]. However, in terms of food production, the soil characteristics play an essential role, as well as the interaction between soil type and plant genotype [5]. Moreover, vegetables when grown on a contaminated soil, accumulate high concentrations of heavy metals, that's why than around half the mean ingestion of Pb and Hg in foods is through plant origin [1].

In potato plants, the concentration of heavy metals varies in the different plants' organs [5], being reported that heavy metal accumulation in *S. tuberosum* L. organs tends to accumulate more in leaf, followed by a similar accumulation in both root and stem and in less quantity on tuber [6]. As such, in areas where soil is contaminated with these metals, it is essential to assess the risk of their uptake by plants, particularly those grown for food consumption, as the case of potato tubers.

Moreover, the relationship between heavy metal contamination on soils and potato productivity requires further research, as it was previously reported that in the presence of low levels of a certain heavy metal may stimulate plant growth (hormesis) [7].

This study aims to assess the accumulation of Cu, Pb, As and Hg in tubers of three different cultivars of *S. tuberosum* L. (Agria, Désirée, and Red Lady) grown in different substrate formulations based on soil samples (mine slag) collected in Caveira mine. This research also aims to evaluate the impact of the different substrate formulations on metal accumulation in tubers and to evaluate the yield of the plants in terms of weight and number of tubers. Furthermore, the study highlights the importance of regulating heavy metal concentrations in food crops to ensure food

safety, especially in areas with a history of mining or industrial pollution or contamination and the need to implement proper agricultural practices to have a safe food for consumers.

2. Materials and Methods

4.1. Experimental Design

Potato seeds of three cultivars of *S. tuberosum* L. (Agria, Désirée and Red Lady) were pre-germinated in a humid and dark environment for about four weeks, prior cultivation.

The mine waste and slag sampling of three sites (A, B and C) (being mentioned as mine waste in the following texts), was carried out on 28 April of 2023 and used to formulate the different substrates for the experiment.

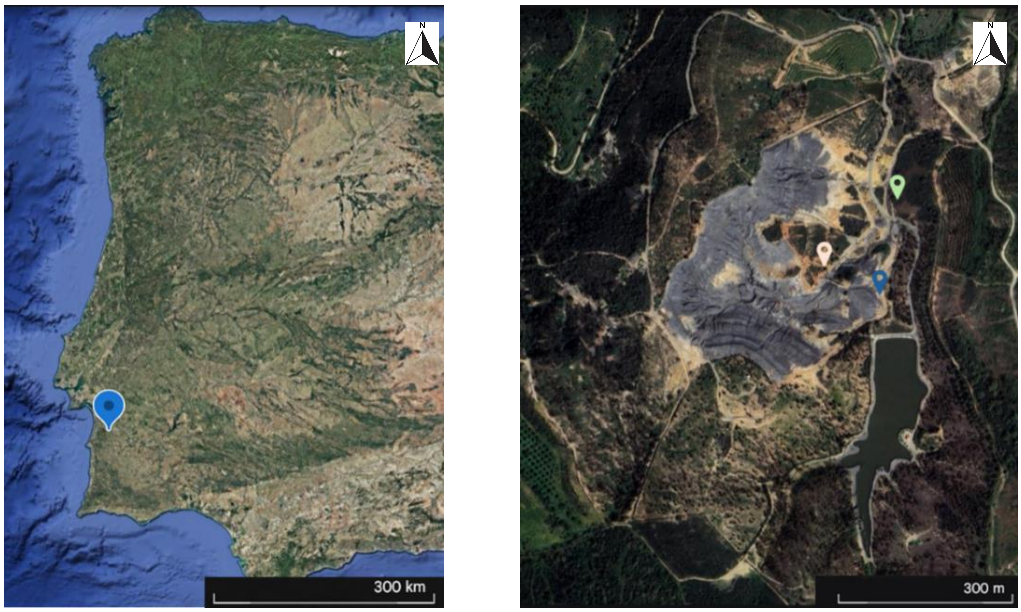


Figure 1. National location of the Caveira mine, Grândola (Portugal) (a), and aerial image of locations sites A (green), B (blue) and C (pink), where mine wastes were collected to formulate the different substrates (b) (Google Earth, 2025).

The different substrate formulations (Table 1) were carried out considering the samples obtained from the three sites. The Cu, Pb, Hg and As content of the three sites were previously evaluated before the formulation of the substrates. The concentration of Cu, Pb, Hg and A were respectively, 4.39 mg/kg, 4.78 mg/kg, <5 mg/kg and 0.90 mg/kg for site A, 0.12 mg/kg, 1.68 mg/kg, < 5 mg/kg and 0.48 mg/kg for site B, and 0.61 mg/kg, 9.31 mg/kg, 0.15 mg/kg and 0.80 mg/kg for site C. Considering the three cultivars and the different substrate formulations the experiment was conducted using 27 plastic pots, each with a capacity of about 10 liters.

Table 1. Composition of the different substrates in the 27 experimental plastic pots and substrate formulations. Control substrate was 100% biological agricultural substrate from Siro Horta brand, recommended for vegetable plants (pH of 5.5 – 6.5, organic matter content of >70% and EC of 150 – 200 mS/cm).

Pots	Cultivar	Soil identification	Substrate Formulations
1	Agria	Control substrate	100% biological agricultural substrate (AS)
2	Désirée		
3	Red Lady		
4	Agria	S1	5 L of AS + 500 mL of site A mine waste
5	Désirée		
6	Red Lady		
7	Agria	S2	5 L of AS + 500 mL of site C mine waste
8	Désirée		
9	Red Lady		
10	Agria	S3	5 L of AS + 500 mL of site B mine waste
11	Désirée		
12	Red Lady		
13	Agria	C1	5 L of AS + 500 mL – 1/3 of site A mine waste, 1/3 of site B mine waste and 1/3 of site C mine waste
14	Agria		
15	Désirée		
16	Désirée		
17	Red Lady		
18	Red Lady		
19	Agria	C2	5 L of AS + 1000 mL – 1/3 of site A mine waste, 1/3 of site B mine waste and 1/3 of site C mine waste
20	Agria		
21	Désirée		
22	Désirée		
23	Red Lady		
24	Red Lady		
25	Agria	C3	5 L of AS + 1500 mL – 1/3 of site A mine waste, 1/3 of site B mine waste and 1/3 of site C mine waste
26	Désirée		
27	Red Lady		

The experiment took place on 5 May 2023 (planting date), at the Department of Earth Sciences at NOVA FCT (Almada, Portugal). Harvest occurred 75 days after planting (17 and 18 July of 2023). During the production cycle of the plants, the experimental pots were watered daily (except for weekends due to the closure of NOVA FCT), around 6 pm, with 150 mL of water from the public supply network of the Municipal Water and Water Services from Almada (SMAS), from the planting date until 5 days before harvest (to allow tuber skin to become firmer).

4.2. Quantification of pH and EC in the different substrates

The pH and electrical conductivity (EC) of the different soil substrates from each pot were measured both before planting and after harvest using a multiparameter analyzer (Consort C6030 – Consort bvba, Turnhout, Belgium), with SP21 and SK20 electrodes. For each pot, one gram of soil substrate was mixed with 100 mL of

ultrapure water and measurements were taken in duplicate at a reference temperature of 20 °C.

4.3. Mineral content in soil substrates and in tubers

The mineral concentrations of Cu, Pb, As and Hg were measured in mine waste from sites A, B, and C, as well as in the control substrate, the different substrate formulations (before plantation and after harvest) and in tubers of *S. tuberosum* L. For the tubers, the analysis was carried out after the samples were dried at 60 °C until they reached a constant weight and were grounded. All samples were analyzed using an XRF analyzer (VANTATM Handheld XRF Analyzer, Olympus ESPOO, Finland). The analyzes were carried out in quadruplicate and the analyzer's detection limit was < 5 mg/kg for Pb, As, Cu and Hg.

4.4. Yield parameters

After the tubers of the three *S. tuberosum* L. cultivars were carefully collected and any soil particles were removed, the fresh weight of individual tubers was determined using a digital balance (accuracy of 0.01 grams). The total weight of the tubers per pot was quantified and the number of tubers per plant was also carried out.

4.5. Statistical Analysis

Statistical analysis was performed using R software (version 4.4.2.). One-way ANOVA was applied in mineral content of the different substrate formulations to assess differences between before plantation and after harvest considering each substrate formulation for each cultivar (Agria, Désirée and Red Lady). Additionally, One-way ANOVA was also used in Cu content to evaluate differences between tubers of *S. tuberosum* L. within each substrate formulation and was carried out for each cultivar. Tukey's test was used for mean comparison and a 95% confidence level was adopted for all tests.

PCA analysis was performed for all the different parameters analyzed, the data from the two main principal components was plotted.

3. Results

3.1. Cu, Pb, As and Hg characterization in substrate formulations

The analysis of Cu, Pb, As and Hg in the different substrate formulations was carried out before plantation and after harvest (Fig. 2), to assess differences between the metal content after the end of *S. tuberosum* L. plants cycle. Significant differences in Cu, Pb, As and Hg concentrations between the different soil types before plantation

and after harvest were observed in Agria, Désirée and Red Lady cultivars. Overall, substrate formulations C1 and C2 show much higher Cu concentrations compared to the remaining substrate formulations, especially compared to the control. In Agria and Red Lady cultivars in C3, a higher Cu content was observed. Regarding Pb, the content before plantation is higher than after harvest (except in S1 for Agria and in C1 for Red Lady). Overall, Pb concentration in C1, C2 and C3 are higher compared to the other substrate formulations. Considering As, for all cultivars, the concentration of this metal tends to be higher in C1 compared to the remaining substrate formulation, especially for Agria. Regarding Hg, values above the detection limit of the equipment were only obtained in S3, C1, C2 and C3 substrate formulations. In fact, S3 shows the highest content of Hg in the three cultivars (both before plantation and after harvest).

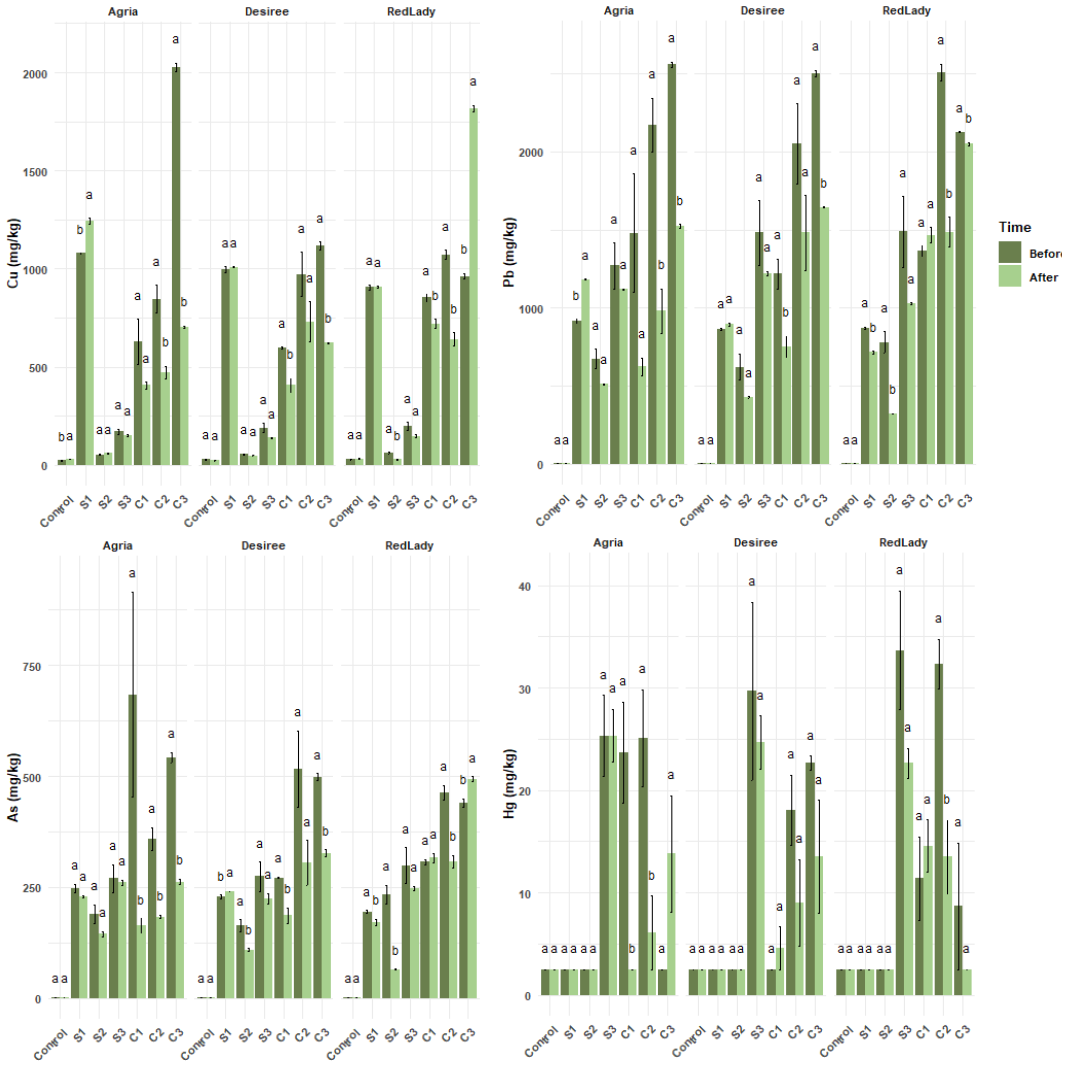


Figure 2. Mineral content of Cu, Pb, As and Hg (mg/kg) of the different substrate formulations before plantation (before) and after harvest (after). In case of the value was below the detection limit of the equipment, half of the value of the detection limit of the mineral element in question was considered in terms of statistic representation. Each value represents the mean (n=4-6) ± SE. ANOVA analysis, $p<0.05$, performed separately for each cultivar, for each substrate formulation between before plantation and after

harvest. Different letters express significant differences for each time (before plantation or after harvest) among each substrate formulation (a,b), with a for the highest values.

3.2. Cu, Pb, As and Hg in tubers

After harvest, mineral content of Cu in tubers of the three cultivars of *S. tuberosum* L. (Agria, Désirée and Red Lady) was carried out (Fig. 3). Significant differences were obtained for Agria, Désirée and Red Lady among the different substrates' formulations regarding Cu content in tubers. Overall, Agria shows lower Cu accumulation compared to Désirée and Red Lady cultivars, especially in Control, S2 and C3. Both Agria and Red Lady presented significantly higher Cu content in S1, while the lowest content was obtained in Control and S2, and in S2, respectively. Moreover, Désirée showed a different accumulation pattern for Cu, showing a significantly higher Cu content in C2 and C3, while a significantly lower content was found in Control.

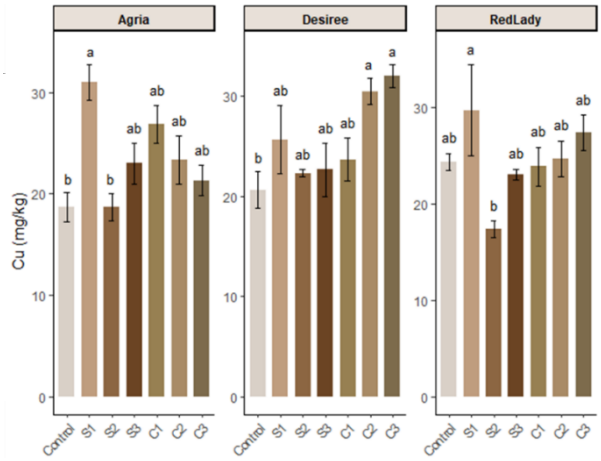


Figure 3. Mineral content of Cu (mg/kg) in tubers of three cultivars of *S. tuberosum* L. (Agria, Désirée, and Red Lady), grown in different substrate formulations. Each value represents the mean (n=4-6) ± SE. ANOVA analysis, $p<0.05$, performed separately for each cultivar, between the different substrates' formulation. Different letters express significant differences considering each cultivar among each substrate formulation (a,b), with a for the highest values.

The data presented in Table 2 shows the concentration of Pb, As and Hg in the tubers of Agria, Désirée and Red Lady cultivars grown in different substrate formulations. For the three cultivars, Hg content in tubers were below the limit of detection of the equipment (5 mg/kg). For Agria, Pb concentration were mostly below 5 mg/kg (the limit of detection of the equipment) in Control, S1 and S2. The highest Pb and As concentration in Agria cultivar was observed in C2 with concentrations of 9.4 mg/kg and4 mg/kg, respectively. Désirée cultivar showed the greater variation in Pb concentration and the highest content, especially in S3 (19.7 mg/kg), C2 (23.8 mg/kg) and C3 (27.6 mg/kg). Red Lady followed a similar pattern to Désirée, with an higher content of Pb in S3 (13.0 mg/kg) and C3 (9.0 mg/kg). Regarding As content, Désirée cultivar showed higher values in C2 (6.5 mg/kg) and C3 (6.3 mg/kg), while Red Lady

cultivar presented the highest value obtained among the three cultivars – 14. 8 mg/kg – in C2.

Table 2. Mineral content of Pb, As and Hg (mg/kg) in tubers of the three cultivars of *S. tuberosum* L. (Agria, Désirée and Red Lady), grown in the different substrates' formulation. Each value represents the mean (*n*=4-6) ± SE.

Cultivar	Substrate formulation	Pb	As	Hg
Agria	Control	< 5	< 5	< 5
	S1	< 5	< 5	< 5
	S2	< 5	< 5	< 5
	S3	6 ± 0.4	< 5	< 5
	C1	6 ± 0.4	< 5	< 5
	C2	9.4 ± 1.0	4 ± 0.4	< 5
	C3	6.7 ± 0.3	< 5	< 5
Désirée	Control	< 5	< 5	< 5
	S1	< 5	4.5 ± 0.4	< 5
	S2	5 ± 0.4	< 5	< 5
	S3	19.7 ± 1.2	6 ± 0.4	< 5
	C1	5 ± 0.4	6 ± 0.4	< 5
	C2	23.8 ± 0.4	6.5 ± 1.2	< 5
	C3	27.6 ± 0.3	6.3 ± 0.3	< 5
Red Lady	Control	< 5	< 5	< 5
	S1	5.0 ± 0.1	< 5	< 5
	S2	5.5 ± 0.4	< 5	< 5
	S3	13.0 ± 0.4	4 ± 0.4	< 5
	C1	9 ± 1.5	< 5	< 5
	C2	5.3 ± 1.5	14.8 ± 0.4	< 5
	C3	9.0 ± 0.5	< 5	< 5

3.3. Yield parameters

In Figure 4 is represented the tubers per plant obtained after harvest for the three cultivars (Agria, Désirée and Red Lady), grown in the different substrates' formulations. As such, Agria shows the highest number of tubers per plant in C2, C3, S1 and S2 compared to the remaining cultivars, while shows the lowest number of tubers per plant in S3. Désirée cultivars show a different pattern, with C1 and S3 yielding the highest number of tubers per plant, while Control and C3 show the lowest values. In Red Lady cultivar, it is possible to verify another different pattern, where the number of tubers per plant is similar in C3 and S2. Moreover, S1, S2 and S3, especially for Red Lady, Agria and Désirée, respectively.

Total tuber weight per plant was also assed after harvest (Fig. 4). Thus, Agria cultivar presents the highest total tuber weight per plant in S2 and C3 substrate formulations, with S2 having the highest yield. Désirée and Red Lady cultivar shows a different tendency. In fact, Désirée cultivar showed the highest total tuber weight per plant in C3 and S3, while Red Lady showed in S1 and S3. Moreover, the S3 substrate shows the highest tuber weight per plant for both Désirée and Red Lady,

while S2 had the highest yield for Agria. The C1 substate has a lower performance regarding yield per plant in Red Lady cultivar.

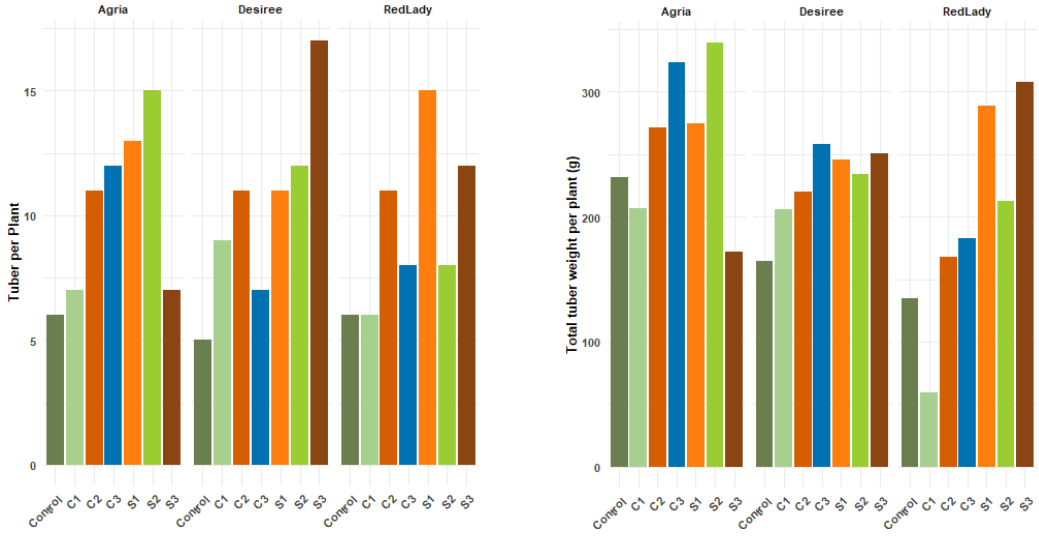


Figure 4. The number of tubers per plant and the total tuber weight per plant (g) obtained at harvest for the three cultivars of *S. tuberosum* L. (Agria, Désirée and Red Lady), grown in the different substrates' formulations.

3.4. Principal component analysis

The PCA (Principal Component Analysis) was conducted considering all the parameters studied (Fig. 5). In Fig. 5-a, it can be observed that the Agria cultivar is more concentrated in the upper left quadrant, while the Désirée cultivar is distributed along the two principal components, with a tendency to group around the positive PC2 axis. The Red Lady cultivar extends further along the positive PC1 axis, suggesting that it has distinct characteristics from the other two cultivars. The dispersion of the three cultivars indicates that there are differences between the cultivars when considering the first two principal components (PC1 and PC2), which explain 53.4% and 17.2% of the total variability, respectively. The elliptical shape of the clustering areas demonstrates that, although the cultivars are grouped, there is still internal variation within each cultivar. The Hg_tuber variable should be disregarded, as the obtained values were below the detection limit of the equipment. Pb_tuber and As_tuber have a significant contribution to PC1, while Cu_bp (Cu content in substrate formulations before plantation) and Cu_ah (Cu content in substrate formulation after harvest) contribute more to PC2. The yield and number_tuber appear to be related to other variables, namely Pb_tuber and As_tuber. In this sense, the variables related to yield seem to be correlated with the concentration of heavy metals in the tubers, particularly Pb and As, and contribute moderately to the principal components, being two of the main variables responsible for the variation between the cultivars observed in the PCA. Additionally, it can be seen that the Cu content in substrate formulation both before planting and

after harvest has an important, but lesser, contribution compared to Pb_tuber and As_tuber.

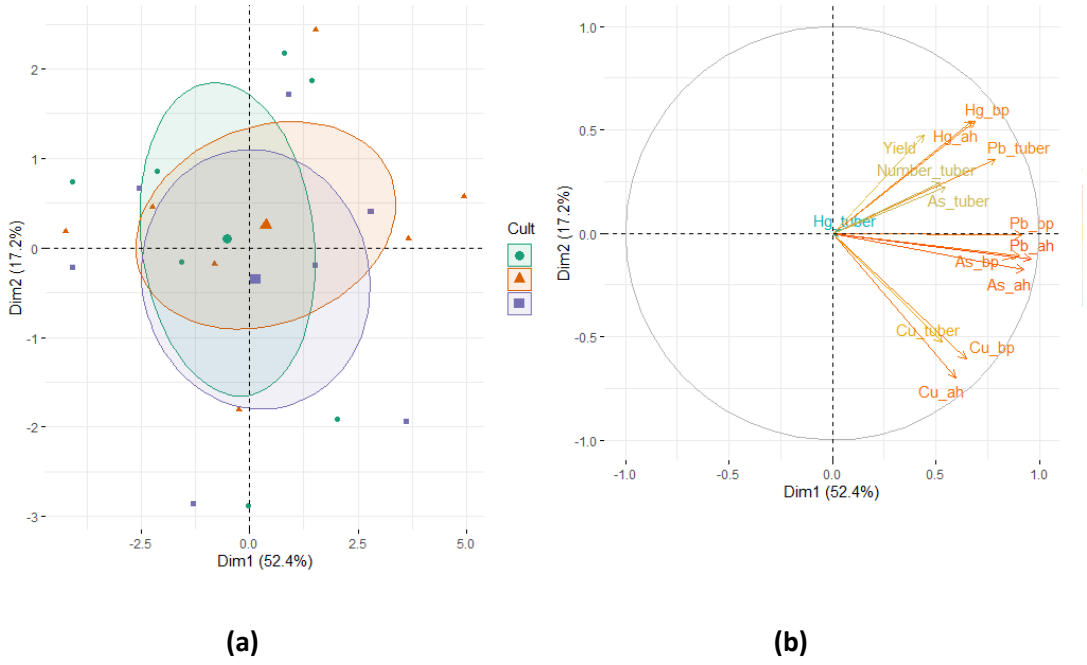


Figure 5. Principal component analysis (PCA) for PC1 (or Dim 1) and PC2 (or Dim 2) for each parameter studied (variance of 52.4% for PC1 and 17.2% for PC2) (a) and the contribution of variables in PC1 and PC2 of the variables studied (b).

4. Discussion

The findings of our study reveal a complex interaction between potato cultivars and the different substrate formulations, influencing both heavy metal accumulation in tubers and yield parameters. Our results indicate that both cultivar genotype and substrate formulation significantly influence heavy metal uptake and accumulation in *S. tuberosum* L. tubers, which is consistent with previous findings [8,9].

The three cultivars used in this study (Agria, Désirée and Red Lady), exhibited differences in heavy metal accumulation, suggesting that the interaction between cultivar and the type of substrate (Table 1) plays an important role in the uptake of metals (Fig. 3 and Table 2). In fact, overall, there is a decrease in the heavy metal concentration in the soil after harvest (Fig. 2), indicating a plant accumulation or lixiviation during the plant's watering. The PCA analysis (Fig. 5) further substantiates these results, considering that the elliptical shape of the clustering areas suggests that while the cultivars are grouped, there is still significant internal variation within each cultivar (Fig. 3 and Table 2).

For instance, Désirée cultivar accumulated more Pb while Agria accumulated less As and Pb in tubers (Table 2) which align with the concept of differential metal

accumulation strategies among plants, as described by Violante et al. (2010) [10]. Moreover, the cultivar-specific patterns of heavy metal accumulation in our study could be attributed to differences in root architecture or molecular mechanisms which control metal uptake and translocation [11].

Moreover, regarding yield (Fig.4), it was possible to observe higher concentrations of heavy metals in substrate formulation actually promoted greater tuber production, which can be due to the hermetic response [7]. This relationship was also observed in the PCA analysis (Fig. 5) - the correlation between yield parameters and Pb and As content in tuber – which also suggests a complex physiological interactions between metal accumulation and plant yield.

For agronomic crops, the maximum allowable concentration of As is 0.2 mg/kg on fresh-weigh basis [12] and for Pb is 0.1 mg/kg on a fresh-weigh basis according to the European Commission Regulation of 2006 [13], as such, there is an exceedance of the regulatory limits in most of tubers (Table 2). The exceedance of regulatory limits for Pb and As in most tubers raises emphasizes the need for caution when producing potatoes in areas with higher heavy metal concentrations, regardless of the apparent productivity obtained. As such, the implementation of proper agricultural practices to ensure food safety is crucial to avoid risk for human health.

5. Conclusions

This study demonstrates significant variability in heavy metal accumulation among potato cultivars Agria, Désirée and Red Lady when grown in substrates contaminated with mine slag. The differences observed in the accumulation of Cu, Pb and As highlight the important role of cultivars and genotypes in uptake patterns in heavy metals, with Désirée cultivar showing greater susceptibility to Pb accumulation while Agria demonstrated reduced uptake of both As and Pb. Additionally, most tubers exceeded regulatory limits for Pb and As and the increase in yield under higher heavy metal concentration suggests a complex physiological adaptation mechanism that needs further research. Furthermore, the PCA analysis revealed that heavy metal concentrations (Pb and As content in tubers) are key factors that influenced the variation observed between the three cultivars studied. Moreover, the results also emphasize the cultivar-specific uptake and accumulation of Cu, Pb, As and even Hg (despite the concentration being below the detection limit of the equipment) and the importance of considering both genetic and environmental factors when selecting cultivars and agricultural practices, especially in areas contaminated with heavy metals.

Author Contributions: Conceptualization, A.R.F.C. and M.S.; methodology, A.R.F.C., M.S., J.A. and F.H.R; formal analysis, A.R.F.C. and J.C.; investigation, A.R.F.C. and J.C.; resources, A.M.C., C.C.P., D.D., I.L., M.M.S. and F.C. L.; writing—original draft preparation, A.R.F.C. and M.S.; writing—review and editing, A.R.F.C. and M.S.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work received funding from Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., Portugal, through R & D Unit GEOBIOTEC - UID/04035: GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to thank Casa Carvalho, located at Rua Quinta dos Carvalhos, Sobreda, for offering the seed potatoes.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Rai, S.; Gupta, S.; Mittal, P. C. Dietary Intakes and Health Risk of Toxic and Essential Heavy Metals through the Food Chain in Agricultural, Industrial, and Coal Mining Areas of Northern India. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* **2014**, *21*(4), 913–933.
2. Ali, H.; Khan, E.; Sajad, M. A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere* **2013**, *91(7*), 869–881.
3. Oves, M.; Khan, M. S.; Zaidi, A.; Ahmad, E. Soil Contamination, Nutritive Value, and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals: An Overview. In *Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation*; Zaidi, A.; Wani, P.; Khan, M., Eds.; Springer: Vienna, 2012.
4. Devaux, A.; Kromann, P.; Ortiz, O. Potatoes for sustainable global food security. *Potato Res.* **2014**, *57(3–4*), 185–199.
5. Khan, A.; Khan, S.; Khan, M.; Qamar, Z.; Waqas, M. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2015**, *22*, 13772–13799.
6. Xu, D.; Chen, Z.; Sun, K.; Yan, D.; Kang, M.; Zhao, Y. Effect of cadmium on the physiological parameters and the subcellular cadmium localization in the potato (*Solanum tuberosum* L.). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2013**, *97*, 147–153.
7. Poschenrieder, C.; Cabot, C.; Martos, S.; Gallego, B.; Barceló, J. Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Sci.* **2013**, *212*, 15–25.
8. Mulligan, C. N.; Yong, R. N.; Gibbs, B. F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Eng. Geol.* **2001**, *60(1–4*), 193–207.
9. Dunbar, K. R.; McLaughlin, M. J.; Reid, R. J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *J. Exp. Bot*. **2003**, *54(381*), 349–354.
10. Violante, A.; Cozzolino, V.; Perelomov, L.; Caporale, A. G.; Pigna, M. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *J. Soil Sci. Plant Nutr*. **2010**, *10(3*), 268–292.
11. Clemens, S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* **2006**, *88(11*), 1707–1719.
12. Kabata-Pendias, A. *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2011.
13. European Commission Regulation Nº 1881/2006 of 19 December 2006 Setting Maximum Levels for Certain Contaminants in Foodstuffs. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32006R1881 (accessed on 20 March 2025).

Foliar biofortification with calcium in *Solanum tuberosum* L. cv. Rossi: effects on yield and mineral accumulation

Ana Rita F. Coelho[1,2]*, Inês Luís[1,2], Ana C. Marques[1,2], Cláudia Pessoa[1,2], Diana Daccak[1,2], Fernando Lidon[1,2], Manuela Simões[1,2], Maria Manuela Silva[1,2], Paulo Legoinha[1,2], José C. Ramalho[2,3], Isabel P. Pais[2,4], José Semedo[2,4], Paula Scotti-Campos[2,4], Fernando Reboredo[1,2]

1 Earth Sciences Department of NOVA School of Sciences and Technology, Campus de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; arf.coelho@fct.unl.pt; idc.rodrigues@campus.fct.unl.pt; amc.marques@campus.fct.unl.pt; c.pessoa@fct.unl.pt; d.daccak@campus.fct.unl.pt; fjl@fct.unl.pt; mmsr@fct.unl.pt; mma.silva@fct.unl.pt; pal@fct.unl.pt; fhr@fct.unl.pt;

2 GeoBioTec Research Center, NOVA University Lisbon, 2829-516 Caparica, Portugal; cochichor@mail.telepac.pt; isabel.pais@iniav.pt; jose.semedo@iniav.pt; paula.scotti@iniav.pt;

3 PlantStress & Biodiversity Lab, Centro de Estudos Florestais (CEF), Associate Laboratory TERRA, School of Agriculture (ISA), University of Lisbon (ULisboa), Quinta do Marquês, Av. República, 2784-505 Oeiras, and Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

4 National Institute of Agrarian and Veterinary Research (INIAV), Quinta do Marquês, 2784-505 Oeiras, Portugal;

* Correspondence: arf.coelho@fct.unl.pt

Abstract: Potato (*Solanum tuberosum* L.) is an essential food crop worldwide, being an ideal staple for biofortification. In recent years, various agronomic biofortification approaches have been implemented around the globe using different mineral elements, such as Fe, Zn, K, B, and Ca, with diverse effects on yield, mineral content, and quality parameters (namely, dry matter content and tuber size). This study aims to evaluate the impact of Ca biofortification through foliar applications on the productivity of *S. tuberosum* L. cv. Rossi. The study was conducted in an experimental field in the West region of Portugal (Lourinhã) with seven foliar applications carried out with calcium chloride or calcium chelated with EDTA (Ca-EDTA) at 12 and 24 kg.ha^{-1}. The soil and irrigation water were characterized, with the soil being suitable for potato cultivation and the irrigation water classified as calcium sulfate bicarbonate. Results indicated lower productivity in the treatments with calcium chelated with EDTA compared to the control and treatments with calcium chloride. In fact, the treatment with 12 kg.ha^{-1} of Ca-EDTA showed a productivity decrease of over 50%, but with a higher Ca biofortification index (*i.e.*, a 3.9-fold increase compared to the control tubers). Additionally, the content of K, S, and P significantly increased in this treatment, while the control showed the highest productivity but the lowest content of Ca, K, S, and P. No significant differences were observed in tuber size between treatments. Dry matter content showed significant differences between treatments, exceeding 20% only in control and the treatment with 12 kg.ha^{-1} of calcium chloride. In this context, the data demonstrates that foliar application of Ca products significantly increases the Ca content in *S. tuberosum* L. tubers, despite the reduced yield in treatments with Ca-EDTA. Therefore, future research should explore the optimization of calcium concentrations to balance both yield and mineral enrichment, in order to avoid compromising tuber yield.

Keywords: potato; foliar sprays; calcium chloride; calcium chelated with EDTA; yield

1. Introduction

Potato (*Solanum tuberosum* L.) is one of the most important food crops around the world, being a rich source of carbohydrates and minerals, and recently is considered a target for biofortification. In this context, biofortification has gained attention as an effective strategy to combat mineral deficiencies [1,2]. Among the different approaches to biofortification, foliar applications of mineral elements, such as calcium (Ca), iron (Fe), zinc (Zn) and potassium (K) are being used to enhance the nutritional profile of food crops [3]. Calcium, in particular, represents an essential mineral element for human health, being essential in the development and maintenance of bone structure, blood coagulation and in a various metabolic processes [4].

Different agronomic biofortification itineraries have been implemented in *S. tuberosum* L. plants in order to enhance their mineral content, namely in Ca [5-8], Fe [9,10] or Zn [11,12]. Considering Ca, foliar applications with calcium chloride led to an increase in tuber yield [6,8] or can increase significantly the Ca content in tubers, although the effects on yield and other quality parameters such as tuber size and dry matter content can be variable. As such, the chemical forms of calcium applied can have different effects on plants [11].

The use of calcium chloride is already commonly used, but the use of chelates such as EDTA has recently been investigated. Moreover, chelated minerals are often showing greater absorption and translocation in plants [13].

In this context, considering that the impact of different sources of Ca on potato yield and mineral content remains unclear, this study aims to evaluate the effect of Ca biofortification on yield and mineral content of *S. tuberosum* L. tubers in cv. Rossi through foliar applications of two solutions: calcium chloride and Ca-EDTA at different concentrations (12 and 24 $kg.ha^{-1}$), in order to provide insights into the optimization of Ca biofortification strategies for improving both potato nutrition and yield.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental design

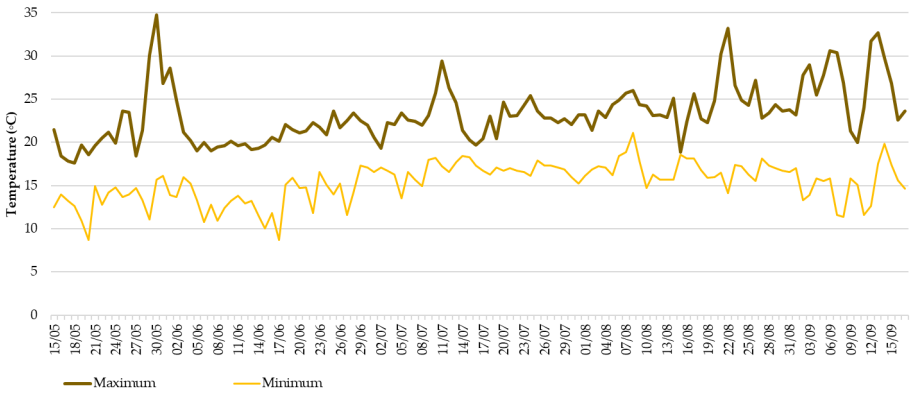
One potato field was used for growing a commercial *S. tuberosum* L. cultivar (Rossi) located in Lourinhã, in the western region of Portugal (Fig. 1), with an area of about 50 m^2.

Figure 1. National (a) and regional (b) geographic location of the experimental field (39°16'12"N 9°14'14"W). Imagens were obtained through Google Earth (accessed on 19 February 2025).

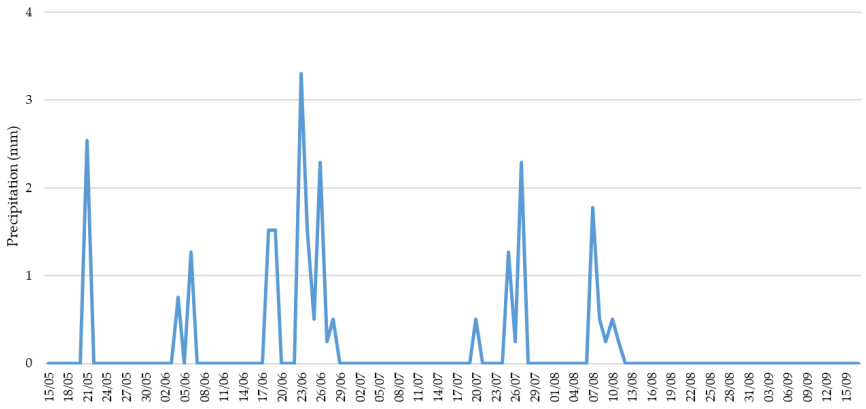
After the beginning of plant's tuberization, seven foliar applications were carried out, at intervals of 6 to 8 days, with a concentration of 12 or 24 kg.ha^{-1} of $CaCl_2$ or Ca-EDTA. The concentration of 24 kg.ha^{-1} of Ca-EDTA was only applied once (in the first foliar application) due to the visualization of toxicity symptoms. The planting date was 15/5 and the harvest was carried out on 17/9. The seven foliar applications were carried out on 17/7, 22/7, 29/7, 5/8, 12/8, 19/8 and 26/8 of 2019. The crop cycle duration was 125 days.

2.2. Climate conditions

Climate conditions of temperature and precipitation were obtained from Windy online platform (Fig.2). During the crop cycle from the date of the plantation to harvest, the temperature ranged between 8.7 ºC and 34.8 ºC, an average precipitation of 0.19 mm (minimum 0 mm and maximum 3.3. mm).



(a)



(b)

Figure 2. Daily range of reported temperatures (a) and precipitation (b) during the production cycle (15/5 to 17/9). The graphical projection was generated based on data available from Windy online platform (*www.windy.com*).

2.3. Soil characterization

In the experimental field, a hexagonal grid was applied and 9 soil samples (100 g, picked up at 30 cm depth) were collected. Soil samples were sieve (2 mm nylon) to remove debris before analysis and dried at 105°C for 24h (until constant weight). Organic matter was determined after combustion for 4h at 550 °C. Calcium, K, S and P content was quantified by an XRF analyzer (model XL3t 950 He GOLDD+, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA). The electrical conductivity and pH were determined by a multiparameter analyzer (Consort C 6030) with SP21 (pH) and SK20T (EC) electrodes, in a soil mixture with water (1:2.5) under stirring after a thermal bath (25°C) for 30 minutes.

2.4. Irrigation water characterization

The quality of the irrigation water was analyzed considering physical and chemical parameters (pH, electrical conductivity, calcium, potassium, magnesium, sodium, sulfate, bicarbonate, and chloride). Electrical conductivity (carried out at 20 °C) and pH were determined using multiparameter analyzer (Consort C 6030) with SP21 (pH) and SK20T (EC) electrodes. Calcium, sodium, potassium and magnesium ions were quantified by chromatography using chromatograph of Metrohm (Model 761 Compact IC), equipped with column and pre-column (Metrosep cation 1–2, 6.1010.000), using an eluent mixture (4 mM tartaric acid/1 mM dipicolinic acid) at a flow rate of 1 $mL.min^{-1}$ and the injection of a sample aliquot of 10 µL [14]. Bicarbonate was determined by titration, in 100 mL samples, using 0.1 N hydrochloric acid as titrant, in the presence of 0.1 % methyl orange [15]. Chloride, sulphate and nitrate ions were quantified by photometry, using Spectroquant NOVA 60 of Merck and ions specific kits (Merck parameters kit numbers:1.14897, 1.14779 and 1.14773).

Water hydrochemical facies classification was obtained through Piper classification diagram considering dominant ions - dominant anions (sulfate, bicarbonate, and chloride) and dominant cations (calcium, magnesium, sodium, and potassium) [16].

2.5. Mineral content in tubers

Calcium, K, S and P content in tubers of *S. tuberosum* L. was determined after harvest. The samples were cut, dried at 60 ^{o}C until constant weight and grounded. All samples were analyzed by an XRF analyzer (model XL3t 950 He GOLDD+, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA), following Coelho et al. (2022) [17]. The analysis was conducted in quadruplicate for each treatment.

2.6. Tuber's caliber, dry weight content and yield

Total tuber yield, dry weight content and caliber (minimum and maximum diameters) were evaluated after harvest. Dry weight content and caliber was carried out according to Coelho et al. (2022) [17] and were carried out in quadruplicate.

2.7. Statistical analysis

Statistical analysis was performed using R software (version 4.4.2.). One-way ANOVA was applied in mineral content of tubers to assess differences between treatments. Additionally, One-way ANOVA was also used in dry weight content, maximum and minimum diameter to assess differences between treatments. Tukey's test was used for mean comparison and a 95% confidence level was adopted for all tests.

Principal component analysis was performed and the data from the two main principal components was plotted.

3. Results

3.1. Soil and irrigation water characterization

The soil field was characterized according to the pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM) and Ca, K, P and S content (Fig. 3). The average EC, OM and pH was 349 µS.cm −1, 4.6% and 7.4, respectively. Calcium, K, P and S, showed a content of 0.65%, 2.2%, 0.3% and 77.6 mg/kg, respectively.

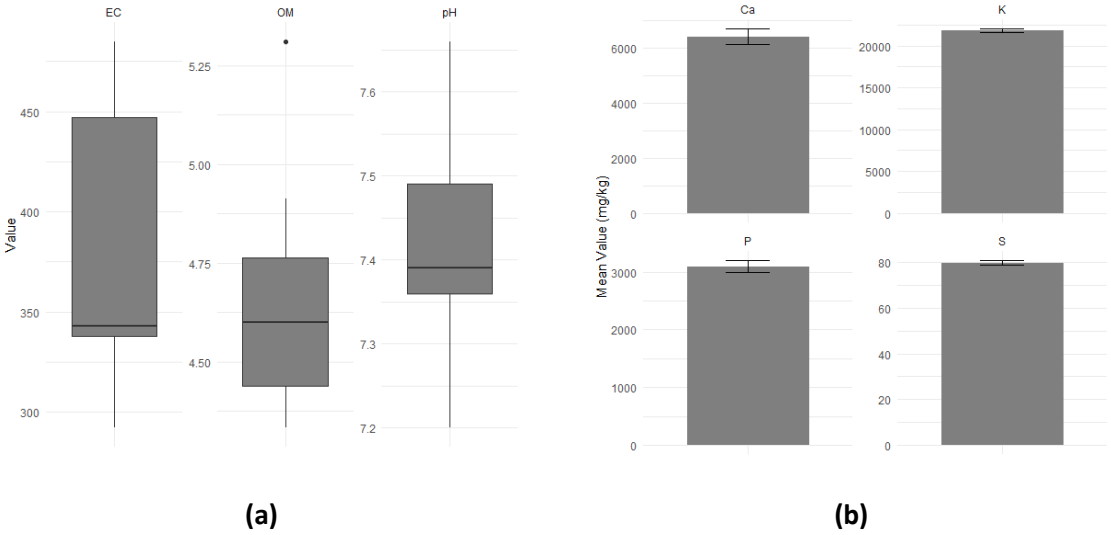
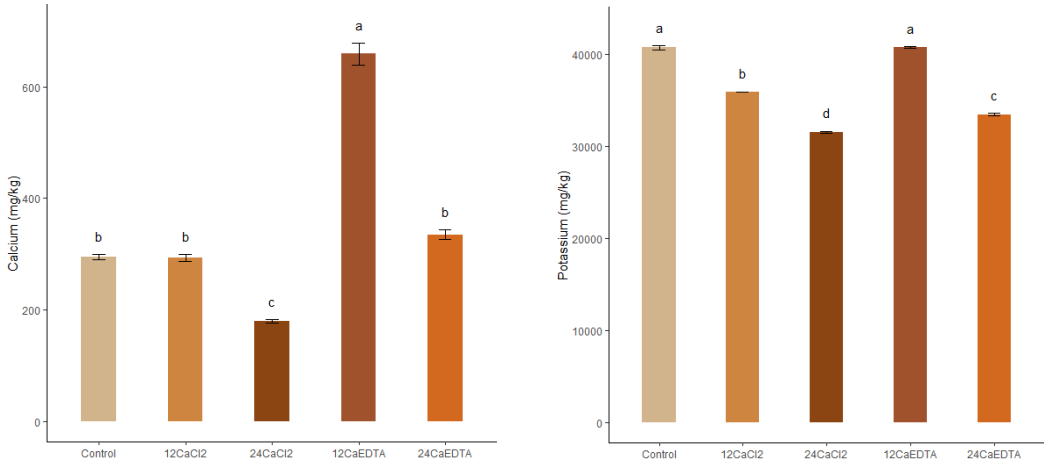


Figure 3. Boxplots of the content of EC (electrical conductivity) (µS.cm $^{-1}$), OM (organic matter) (%) and pH (a) and Ca, K, S and P (mg/kg) (b) in the soil (*n*=9) of the experimental field.

The irrigation water of the field showed a pH of 7.1 and an EC of 1495 µS.cm $^{-1}$ and was classified through Piper diagram as calcium sulfate bicarbonate.

3.2. Mineral content in tubers

Calcium, K, S and P content was assessed in controls and Ca treatments (Fig.4) and significant differences between treatments were verified. Regarding Ca, 12 kg.ha^{-1} Ca-EDTA treatment shows significantly higher content compared to the other treatments and control. In fact, Ca, S and P showed similar mineral accumulation in 24 kg.ha^{-1} $CaCl_2$ treatment and in both Ca-EDTA treatments. For K and S, control and both $CaCl_2$ and Ca-EDTA treatments with 12 kg.ha^{-1} showed similar content. On the other hand, both $CaCl_2$ treatments presented similar contents in Ca and P. Moreover, considering P, 12 kg.ha-1 Ca-EDTA treatment showed the highest content relatively to the other treatments. In Ca, K, S and P, the lowest content was obtained in 24 kg.ha^{-1} Ca-EDTA treatment.



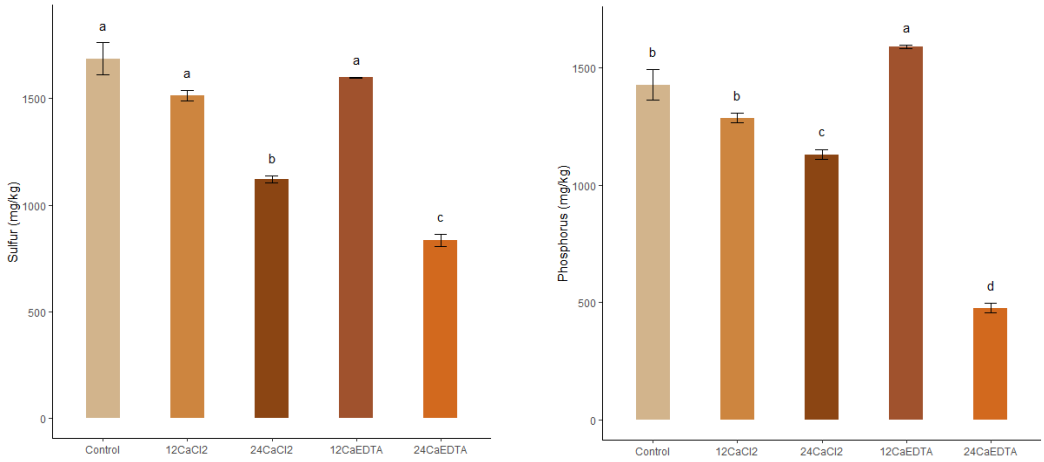


Figure 4. Calcium, K, S and P content (mg/kg) of tubers of *S.tuberosum* L. cv. Rossi at harvest, treated with foliar applications in control plants or with 12 and 24 kg.ha^{-1} of $CaCl_2$ or 12 and 24 kg.ha^{-1} of Ca-EDTA solutions. Each value represents the mean ± SE (n = 4), ANOVA analysis, p<0.05. Different letters express significant differences for treatments among parameters (a, b), with letter a for the highest value.

Overall, it is possible to observed a tendency of a higher Ca, K, S and P content in 12 kg.ha^{-1} Ca-EDTA treatment, compared to the other treatments and control. As such, the results suggest that 12 kg.ha^{-1} Ca-EDTA treatment is the most effective treatment in increasing not only Ca content, but also the other mineral elements studied, while 24 kg.ha^{-1} Ca-EDTA and 12 kg.ha^{-1} $CaCl_2$ treatment seems to be less effective, particularly for Ca and P.

3.3. Tuber's caliber, dry weight content and yield

Dry weight content, caliber (maximum and minimum diameter) of tubers and yield, are represented in Fig. 5. Regarding dry weight content, control showed the highest compared to the other treatments, and 24 kg.ha^{-1} $CaCl_2$, and both Ca-EDTA treatments presented similar dry weight content, with 24 kg.ha^{-1} Ca-EDTA showing the lowest value. Regarding maximum and minimum diameter, no significant differences were observed between treatments, indicating similar values between control and the Ca biofortification treatments. Considering yield, control showed the highest yield, followed by 12 kg.ha^{-1} CaCl2, while 12 kg.ha^{-1} Ca-EDTA showed the lowest yield.

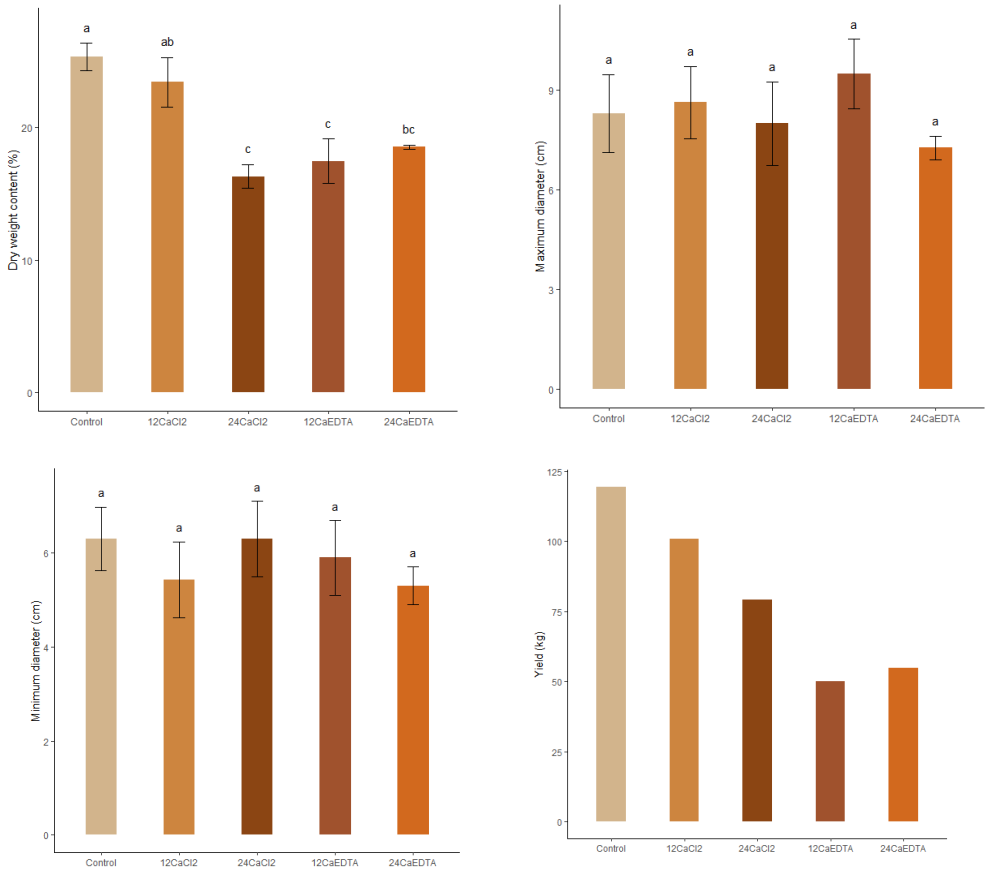


Figure 5. Tubers evaluation, considering dry weight content (%), minimum diameter (cm), maximum diameter (cm) and yield (kg/area of the study) of *S.tuberosum* L. cv. Rossi at harvest, treated with foliar applications in control plants or with 12 and 24 kg.ha^{-1} of $CaCl_2$ or 12 and 24 kg.ha^{-1} of Ca-EDTA solutions. Each value represents the mean ± SE (n = 4), ANOVA analysis, p<0.05. Different letters express significant differences for treatments among parameters (a, b), with letter a for the highest value.

3.4. Principal Component analysis

A principal component analysis (PCA) was performed on the different parameters analyzed to evaluate the similarity between variables and the correlation among the treatments applied and the respective loadings (Fig. 6). The PC1 (or Dim 1) accounts for the greater part of data variability (43.6%), while PC2 (or Dim 2) explains a smaller but still significant part of the variations (25.9%). As such, PC1 and PC2 together explain approximately 69.5% of the total variance, indicating a strong representation of the dataset.

With the PCA projection it is possible to verify that 12 kg.ha^{-1} Ca-EDTA treatment is distinguished by a higher contribution from Ca (Fig.6-a). Probably due to this treatment association with higher Ca content among the different treatments, indicating their impact on Ca biofortification in tubers.

Calcium shows a strong positive correlation with PC1 and a moderate correlation with PC2, while S and P are strongly aligned with both PC1 and PC2, suggesting that

there are important in differentiating the treatments. Regarding K, and both diameters (maximum and minimum), they show moderate contributions for both PC, but with much less influence on the overall variance of the dataset. On the other hand, dry weight content and yield have relatively weak contributions, which suggest that they have less impact on the separation of the treatments in this principal component analysis.

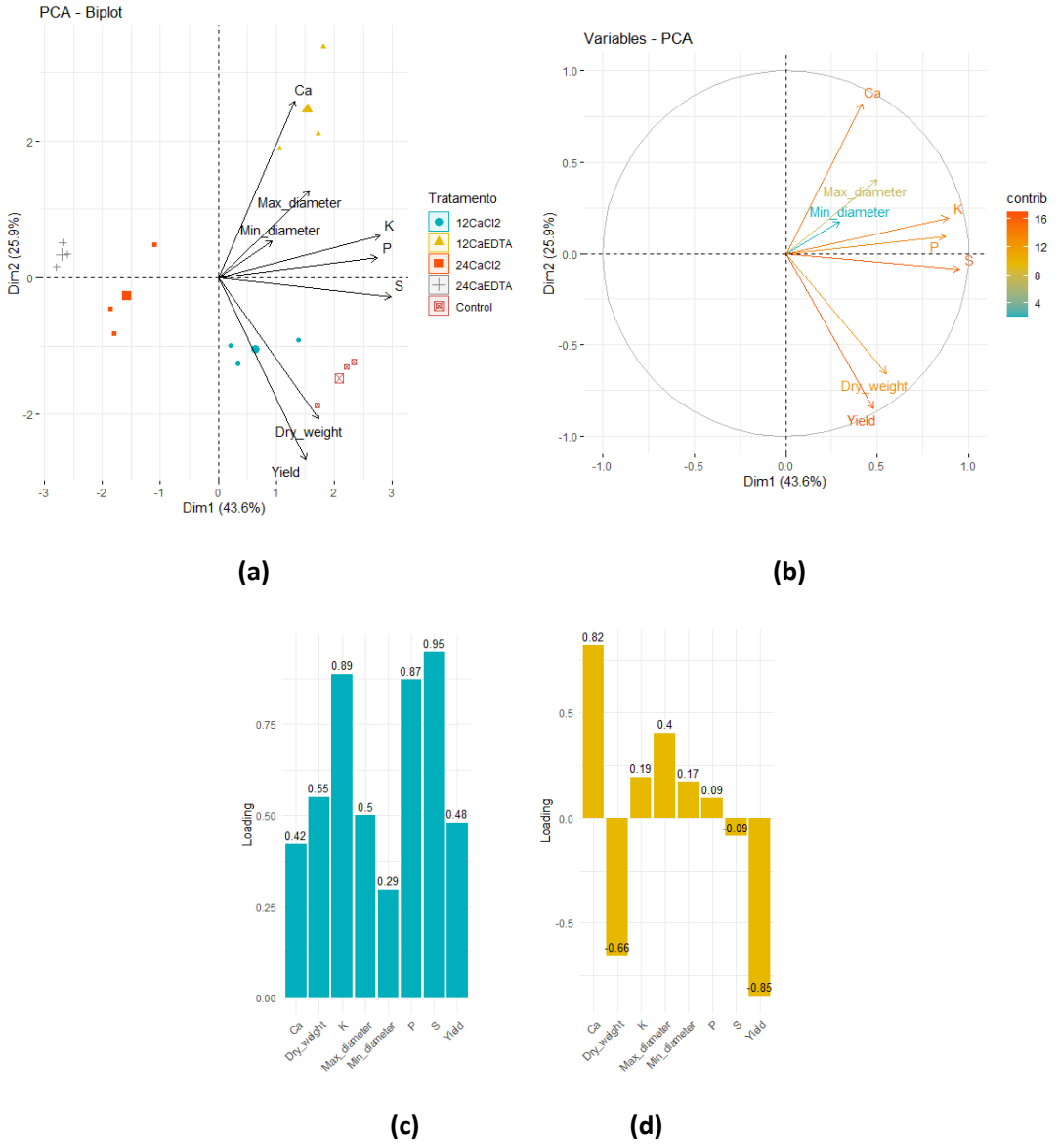


Figure 6. Principal component analysis (PCA) for PC1 and PC2 (variance of 43.6% for PC1 and 25.9% for PC2) (a), contribution of the variables (b) and the loadings of the variables PC1 (c) and PC2 (d), considering *S. tuberosum* L. cv. Rossi, treated with foliar applications in control plants or with 12 and 24 kg.ha^{-1} of $CaCl_2$ or 12 and 24 kg.ha^{-1} of Ca-EDTA solutions.

Considering the loadings (*i.e.*, the weight of each of the variables) of PC1 (Fig.6-c), it is verified all the variables have positive loadings, indicating that this principal component is associated with all of the variables, but has a significant influence of

K (0.89), P (0.87) and S (0.95). Moreover, PC2 seems to be strongly influenced by Ca (0.82), while negatively associated with dry weight content (-0.66) and yield (-0.85).

Nevertheless, considering that yield has a negative correlation with PC2 (-0.85), it is an indicated that treatments with lower yields are positioned differently in the PCA plot, such as 24 kg.ha^{-1} Ca-Cl_2 treatment.

Overall, Ca and yield are key factors in explaining the separation of treatments, and the PCA plot (Fig. 6) provides insights into how the different treatments differ based on their Ca content and yield.

4. Discussion

The data obtained from the different calcium biofortification treatments applied to *S. tuberosum* L. plants cv. Rossi revealed important insights into the effect of Ca sources on tuber yield and mineral content, especially regarding Ca content. The seven foliar applications carried out with $CaCl_2$ or Ca-EDTA solutions at two different doses (12 kg.ha^{-1} and 24 kg.ha^{-1}) significantly influenced yield and Ca, K, S and P content (Fig. 4 and 5).

The soil, which is a source of minerals to plants and accumulates them in the edible parts [18,19], was characterized (Fig. 2) and is suitable for potato cultivation, with a pH within the ideal range for agriculture (6.5 – 7.5) [20]. The irrigation water was classified as calcium sulfate bicarbonate, with an EC below the critical threshold for potatoes (>1.1 dS.m^{-1}) [21].

Considering Ca-EDTA treatments, both resulted in a significant decrease in tuber yield, especially at 12 kg.ha^{-1} dose, where a yield reduction of over 50% compared to control was observed (Fig. 5). In fact, despite the enhancement in Ca content, calcium chelates can lead to a reduction in yield in some crops, due to being toxic to plant when applied repeatedly [22]. In contrast, $CaCl_2$ did not show a higher negative impact on yield, which is probably due to the fact that is a simpler form of Ca, which can be more readily available for plant uptake, which allows a better plant growth and development [6]. Despite 12 kg.ha^{-1} Ca-EDTA treatment presented the lowest yield, it showed a significantly higher Ca content, representing a biofortifcation index of 3.9-fold increase compared to control tubers (Fig. 4). In addition to Ca, the K, S and P content also increase in this Ca-EDTA treatment (Fig. 4).

Regarding the dry matter content across the different treatments, with the highest percentage obtained both control and 12 kg.ha^{-1} $CaCl_2$ treatments, this indicates that 12 kg.ha^{-1} $CaCl_2$ treatment maintained a healthy plant growth and plants

photosynthetic efficiency, which is essential for starch and dry matter accumulation in tubers [23].

No significant differences were observed in tuber caliber (maximum and minimum diameter) between treatments (Fig. 5), which suggests that Ca biofortification did not significantly affect tuber growth in terms of size.

Moreover, with PCA (Fig. 6) it is possible to observe that both Ca-EDTA and $CaCl_2$ treatments exhibit different effects on most of the parameters analyzed. In fact, 12 $kg.ha^{-1}$ Ca-EDTA treatment showed a distinct projection relative to Ca content in tubers (Fig.6-a), which can be attributed to its impact on increasing Ca content in tubers (Fig. 4). Also, Ca position in PC1 indicates that Ca is essential in differentiating the different treatments, which aligns with the main and primary goal of this research. Overall, PCA confirms that both Ca and yield are the two main key factors explaining the differences observed in the plot, indicating the impact of the different treatments relative to Ca and yield.

Furthermore, the results obtained in this research highlight the potential benefits and challenges of Ca biofortification in *S. tuberosum* L. cv. Rossi, especially the duality of Ca biofortification *vs* tuber yield, which should be carefully considered. Future research should focus on optimizing solutions, Ca concentrations/doses and the number and periodicity of the foliar application to balance both yield and Ca enrichment.

5. Conclusions

The foliar applications with $CaCl_2$ and Ca-EDTA significantly influenced Ca mineral content of *S. tuberosum* L. cv. Rossi tubers. In fact, 12 $kg.ha^{-1}$ Ca-EDTA treatment led to the highest Ca biofortification (with 3.9-fold increase relative to control tubers), but with decrease of over 50% in yield. In contrast, 12 $kg.ha^{-1}$ $CaCl_2$ treatment showed similar Ca and yield content with control. Moreover, no significant differences were found in tuber caliber across treatments which indicates no impacts by Ca biofortification process with both solutions applied. Nevertheless, our data demonstrates that future research should explore the optimization of both Ca concentration and type of Ca form to balance both yield and Ca enrichment, to avoid compromising tuber yield.

Author Contributions: Conceptualization, A.R.F.C. and F.L..; methodology, A.C.M., M.S., P.L., F.L. and F.R.; formal analysis, A.R.F.C.; investigation, A.R.F.C, A.C.M., C.P., D.D., I.L.; resources, J.C.R., I.P.P., J.S., P.C., M.M.S.; writing—original draft preparation, A.R.F.C.; writing—review and editing, A.R.F.C.; funding acquisition, J.C.R. and F.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work received funding from PDR2020 and was co-funded by FEADER, under the Portugal 2020 program, through the project PDR2020-101-030719, Partnership n. 17 / Initiative n. 20, as well as from Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., Portugal, through the grant UI/BD/150806/2020 (to

A.R.F.C.), and the projects R & D Unit GEOBIOTEC - UID/04035: GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias GeoBioTec, CEF (UIDB/00239/2020, https://doi.org/10.54499/UIDB/00239/2020), and the Associate Laboratory TERRA (LA/P/0092/2020, https://doi.org/10.54499/LA/P/0092/2020).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors are grateful to Louricoop—Cooperativa de Apoio e Serviços do Concelho da Lourinhã—CRL—Portugal for technical assistance in the field's production

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. White, P. J.; Broadley, M. R. Biofortification of crops with essential mineral elements. *Proc. Nutr. Soc.* **2005***, 64(4*), 508–520.
2. Bouis, H. E.; Saltzman, A. Improving nutrition through biofortification. *Global Food Sec.* **2017**, *12*, 1–8.
3. Saikanth, D. R. K.; Kesarwani, A.; Nain, M.; Pandey, S. K.; Singh, B. V.; Maurya, C. L. Bio-fortification and its impact on global health. *J. Exp. Agric. Int.* **2023**, *45(10*), 106–115.
4. Pravina, P.; Sayaji, D.; Avinash, M. Calcium and its role in human body. *Int. J. Res. Pharm. Biomed. Sci.* **2013**, *4(2*), 659–668.
5. Ibraheem, F. F. R.; AL-Dulaimi, H. A. T. The physiological role of potassium and calcium spraying on vegetative characteristics of two potato varieties. *Int. J. Health Sci*. **2022**, *6(S6),* 7926–7936.
6. Seifu, Y. W.; Deneke, S. Effect of Calcium Chloride and Calcium Nitrate on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield. *J. Hortic*. **2017**, *4*, 1000207.
7. El-Hadidi, E.; El-Dissoky, R.; AbdElhafez, A. Foliar Calcium and Magnesium Application Effect on Potato Crop Grown in Clay Loam Soils. *J. Soil Sci. Agric. Eng*. **2017**, *8*, 1–8.
8. Mohammed, S. R.; Eskov, I. D.; Zeitar, E. M. Effect of Chitosan and Calcium Chloride Application on Tuber Yield and Vegetative Parameters against Potato Gangrene under Field Conditions. *Plant Arch*. **2020**, *20*, 3149–3153.
9. Ramesh, E.; Jana, J.; Chatterjee, R.; Banik, G. Effect of Foliar Application of Secondary and Micronutrients on Quality of Potato. *Int. J. Chem. Stud*. **2019**, *7(1*), 2189–2192.
10. Zhang, R.; Zhang, W.; Kang, Y.; Shi, M.; Yang, X.; Li, H.; Yu, H.; Wang, Y.; Qin, S. Application of Different Foliar Iron Fertilizers for Improving the Photosynthesis and Tuber Quality of Potato (*Solanum tuberosum* L.) and Enhancing Iron Biofortification. *Chem. Biol. Technol. Agric.* **2022**, *9*, 79.
11. White, P. J.; Thompson, J. A.; Wright, G.; Rasmussen, S. K. Biofortifying Scottish Potatoes with Zinc. *Plant Soil* **2017**, *411*, 151–165.
12. Singh, H.; Singh, S.; Kumar, D.; Singh, S. K. Impact of Foliar Application of Zinc on Potato (*Solanum tuberosum* L.) CV. Kufri Pukhraj. *Plant Arch.* **2018**, *18*, 1334–1336.
13. Shahid, M.; Dumat, C.; Khalid, S.; Schreck, E.; Xiong, T.; Niazi, N. K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *J. Hazard. Mater.* **2017**, *325*, 36–58.
14. Medina, L. (Ed.). *Handbook of Water Analysis*; CRC Press: 2000.
15. Rodier, J.; Legube, B.; Merlet, N. *L'analyse de l'eau*, 9th ed.; Dunod: Paris, 2009.
16. Sahab, M. F.; Abdullah, M. H.; Hammadi, G. A.; Hamad, N. S.; Abdulazez, A. A.; Fayyadh, A. H.; Ayed, D. J.; Jalal, A. D.; Sayl, K. N.; Ramal, M. M. Ground Water Quality Evaluation for Irrigation Purpose: Case Study Al-Wafaa Area, Western Iraq. *Int. Inf. Eng. Technol. Assoc*. **2024**, *19*(4), 1415–1424.
17. Coelho, A. R. F.; Lidon, F. C.; Pessoa, C. C.; Daccak, D.; Luís, I. C.; Marques, A. C.; Ramalho, J. C.; Semedo, J. M. N.; Silva, M. M.; Pais, I. P.; Brito, M.; Kullberg, J.C.; Legoinha, P.; Simões, M., Scotti-Campos, P.; Pessoa, M.F.; Reboredo, F.H. Mineral Monitorization in Different Tissues of *Solanum tuberosum* L. during Calcium Biofortification Process. *Horticulturae* **2022**, *8*, 1020.
18. Benjamin, J. G.; Nielsen, D. C.; Vigil, M. F. Quantifying Effects of Soil Conditions on Plant Growth and Crop Production. *Geoderma* **2003**, *116*, 137–148.
19. Subramanian, N. K.; White, P. J.; Broadley, M. R.; Ramsay, G. The Three-Dimensional Distribution of Minerals in Potato Tubers. *Ann. Bot.* **2011**, *107*, 681–691.
20. IPNI. Soil pH and the Availability of Plant Nutrients. Plant Nutrition TODAY. *Int. Plant Nutr. Inst.* Fall **2010**, No. 2. Available online: www.ipni.net (accessed on 20 March 2025).

21. Thornton, M. Potato Growth and Development. In *Potato Production Systems*; Stark, J.; Thornton, M.; Nolte, P., Eds.; Springer: Cham, 2020; pp. 1–13.
22. Alonso, T. A.; Barreto, R.; Prado, R.; Souza, J.; Carvalho, R. Silicon Spraying Alleviates Calcium Deficiency in Tomato Plants, but Ca-EDTA Is Toxic. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2020**, *183*, 659–664.
23. Kumar, D.; Ezekiel, R. Developmental Changes in Sugars and Dry Matter Content of Potato Tuber under Sub-Tropical Climates. *Scientia Hortic*. **2006**, *110(2*), 129–134.

Calcium enrichment in Rocha pears: Agronomic optimization and its effects on nutritional composition

Cláudia Pessoa [1,2,*], Inês Luís [1,2], Ana Marques [1,2], Ana Coelho [1,2], Diana Daccak [1,2], José Ramalho [2,3], António Leitão [2,3], Mauro Guerra [4], Roberta Leitão [4], Paula Scotti-Campos [2,5], José Semedo [2,5], Isabel Pais [2,5], Fernando Reboredo [1,2], Maria Silva [1,2], Manuela Simões [1,2], Paulo Legoinha [1,2], José Almeida[1,2], Fernando Lidon [1,2]

1 Earth Sciences Department of NOVA School of Science and Technology, Campus Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; c.pessoa@fct.unl.pt; idc.rodrigues@campus.fct.unl.pt; amc.marques@campus.fct.unl.pt; arf.coelho@fct.unl.pt; d.daccak@campus.fct.unl.pt; fhr@fct.unl.pt; mma.silva@fct.unl.pt; mmsr@fct.unl.pt; pal@fct.unl.pt; fjl@fct.unl.pt

2 GEOBIOTEC Research Center, NOVA University of Lisbon, 2829-516 Caparica, Portugal; cochichor@mail.telepac.pt; antonioleitao@isa.ulisboa.pt; paula.scotti@iniav.pt; jose.semedo@iniav.pt; isabel.pais@iniav.pt

3 Plant Stress and Biodiversity Laboratory, Forest Research Center (CEF), Associate Laboratory TERRA, School of Agriculture (ISA), University of Lisbon (ULisboa), Quinta do Marquês, Avenida da República, 2784-505 Oeiras, and Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

4 LIBPhys-UNL, Physics Department of NOVA School of Sciences and Technology, Campus Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal; mguerra@fct.unl.pt; rg.leitao@fct.unl.pt

5 National Institute for Agrarian and Veterinary Research, Quinta do Marquês, Avenida da República, 2780-157 Oeiras, Portugal

* Correspondence: c.pessoa@fct.unl.pt

Abstract: Nowadays, the food sector is facing critical challenges in supplying food to a growing population. Furthermore, calcium is an essential nutrient with many physiological functions, and deficits have been linked to pathologies such as osteoporosis. In this framework, an agronomic workflow in Portugal was developed to increase Ca levels in Rocha pear fruits using $CaCl_2$ (0.4 kg/ha - 8 kg/ha). After harvest, the sprayed pears were immersed in a 1.3% $CaCl_2$ solution, then stored in environmentally controlled chamber. In March, calcium content in fruits was analyzed with a μ-EDXRF system. Levels of sucrose, glucose, fructose and sorbitol were quantified using HPLC. Calcium increased in all sections of the fruit compared to the control, with T2 showing higher values in the center, likely due to the higher concentration applied at the start of the workflow. Higher values in the outer part are likely related to both sprays and immersion in $CaCl_2$. Fructose was the most prevalent sugar, followed by sorbitol, glucose, and sucrose. However, sprayed fruits had lower values compared to the control. In conclusion, although calcium increases were achieved, a workflow with higher $CaCl_2$ concentrations at the start (1.6 kg/ha) resulted in higher calcium levels inside the fruit.

Keywords: calcium; foliar sprays; food nutrition; post-harvest treatment; *Pyrus communis* L.

1. Introduction

Challenges such as scarcity of natural resources, land distribution (implying management of lands for agriculture and meat production) and extreme climatic events can undermine food production amidst a growing population [1-3]. Thus, to satisfy consumer's needs, an international consensus sets transformative goals for this sector until 2030, focused on sustainability, resilience, inclusiveness and greater efficiency [3]. In this regard, the 2nd global goal focuses on "End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture" [4].

Enrichment practices such as agronomic biofortification focus on mineral element increases in the edible part of crops by using foliar or soil fertilizers [5]. This provides the food sector with an option to produce raw foods with added value (more nutritious), that can further be processed into products with functional properties (by helping preventing pathologies development) [6]. In fact, calcium (Ca) has been linked to bone health (osteoporosis, rickets), decreases of blood pressure and prevention of hypertensive disorders (pregnancy) [7].

Rocha pear is an important Portuguese variety with a PDO (Protected Designation of Origin), that reached a production of 118 348 tons in 2023, occupying an area of 10 825 ha [8,9]. According to PortFIR [10], pears (based on 5 varieties) can have an edible portion of 78 %. Regarding fruit composition (grams per 100 g of edible portion), carbohydrates are the second largest component (9.4 g, of which 2.4 g corresponds to sucrose) after water (85.1 g). Thus, in this fruit carbohydrates account for 80.5% of energy availability. Furthermore, as a climacteric fruit, sugar content can change during the storage period [11]. Therefore, this study aims to assess Ca increases while monitoring sugar content in pear fruits.

2. Materials and Methods

2.1. Agronomic Experimental Design and Conservation of Fruits

In Portugal, an agronomic workflow comprising 7 foliar sprays (spaced 15 days between each) was carried out on an orchard (of *Pyrus communis* L., located in Alcobaça), between May and August of 2018. The applied agronomic design is presented below (Table 1).

Table 1. Description of foliar fertilization treatments, implemented on the orchard.

Number of Sprays	T1	T2
1st	0.4 kg $CaCl_2$/ha	1.6 kg $CaCl_2$/ha
2nd		
3rd	4 kg $CaCl_2$/ha	4 kg $CaCl_2$/ha
4th	8 kg $CaCl_2$/ha	8 kg $CaCl_2$/ha
5th		
6th		
7th		

For each foliar fertilization ($CaCl_2$) 2 sets of trees (four trees per treatment) were used. For control, another set of trees (twelve) was kept as the control (only water was applied, thus – Ctr = 0 kg $CaCl_2$/ha). After harvest (10th September), the sprayed fruits were immersed in a $CaCl_2$ solution (1.3%), then stored in environmentally controlled chamber (at -0.5 – 1°C, 95% humidity) until March of the following year (when analysis were performed). Control fruits were not immersed but were kept under the same storage conditions as the remaining fruits.

2.2. Analysis of Calcium in Fruits

After storage, fruits (control n = 5, T1 n = 5 and T2 n = 5) were collected from the storage chambers and were washed with deionized water and then horizontally sliced at the equatorial zone (per a stainless-steel blade). The slices were dried (until constant weight at 60 °C (Figure 1)). Then, Ca assessment was performed with a Micro-Energy Dispersive X-ray-Fluorescence system (M4 Tornado Bruker, Germany) as described in Pessoa *et al*. (2022) [12].

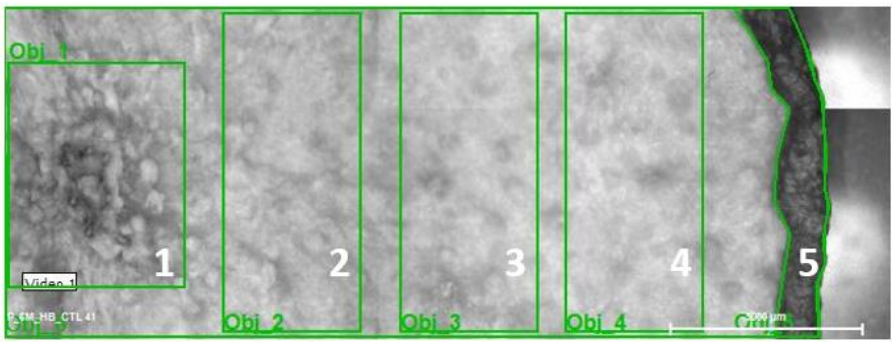


Figure 1. Example of a sliced sample from *Pyrus communis* L. . Green lines delineate different regions for Ca assessment (from center to epidermis, regions 1 to 5 respectively).

2.3. Fruit Size Analysis

At harvest, the height and diameter of fruit from the control and treatments T1 and T2 were measured with a caliper.

2.4. Sugar Content Analysis

Sugar content analysis in fruits (control, T1 and T2) collected after the storage, followed the procedure detailed in Pessoa *et al*. (2022) [12]. A total of fifteen fruits per treatment (n = 3, thus 5 fruits per sample) were used for sugar extraction, and samples were then injected into an HPLC (Waters, USA) and analyzed with Breeze software, followed by quantification with calibration curves of sorbitol, glucose, fructose and sucrose.

2.5. Statistical Analysis

Statistical analysis was performed with a One-Way ANOVA ($p \leq 0.05$) to assess differences; a Tukey's test for mean comparison was further performed (considering a 95% confidence level).

3. Results

3.1. Calcium Content

The total Ca content was higher in sprayed fruits in comparison to control (Figure 2). A heterogeneous distribution of Ca in the different regions of the fruit is observed, with a predominance of this element on the epidermis (5) and core (1) compared to the inner zones (2 to 4). The Ca increases attained with $CaCl_2$ (resulting from foliar and immersion applications) in the different regions were 1.03 – 3.67 times higher than control, with the total value reflecting increases of 1.24 and 1.75 times.

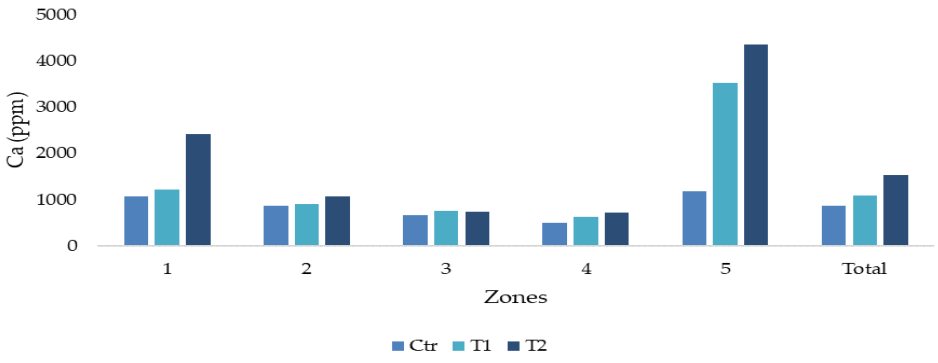


Figure 2. Calcium content in different regions (1 to 5, thus, core to epidermis) and total (corresponding to an average value) of calcium content in of *Pyrus communis* L. after storage.

3.2. Fruit Size

Height and diameter values (Figure 3) of fruits sprayed with $CaCl_2$, during the growth stage, did not present significant differences in regard to control. Fruit`s height varied between 80 - 94 mm, while diameter ranged from 67 – 71 mm.

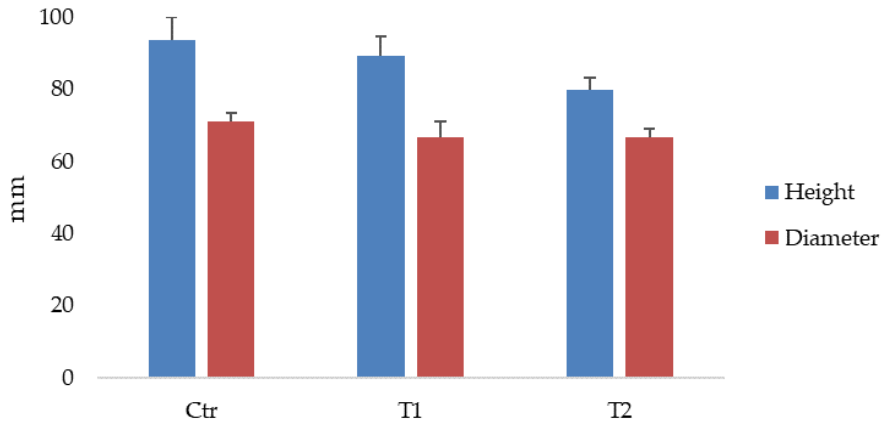


Figure 3. Fruit size (height and diameter) at harvest of *Pyrus communis* L. No asterisks indicate the absence of significant differences between treatments. Ctr = 0 kg $CaCl_2$/ha; T1 – initial sprays with 0.4 kg $CaCl_2$/ha; T2 – initial sprays with 1.6 kg $CaCl_2$/ha.

3.3. Sugar Content

Fructose was the most prevalent sugar, followed by sorbitol, glucose, and sucrose (Figure 4). However, sprayed fruits presented significantly lower values compared to the control.

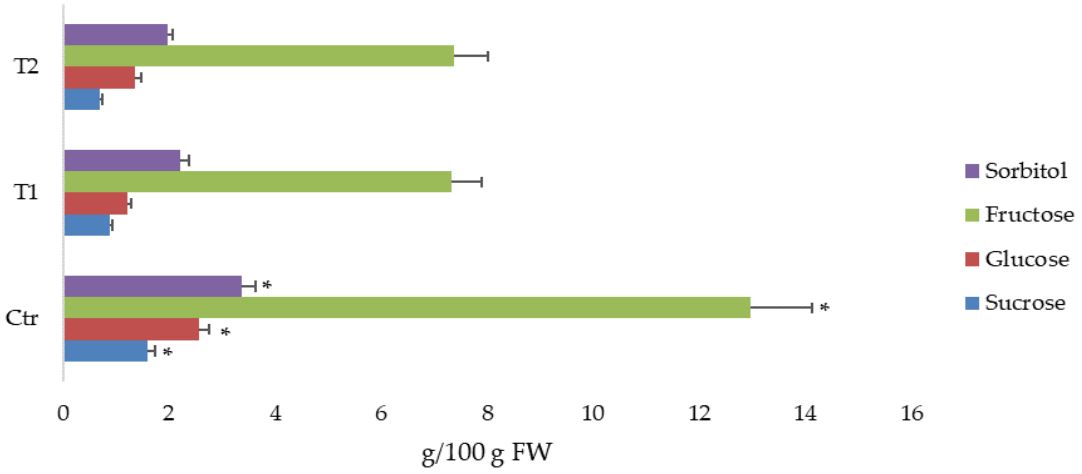


Figure 4. Average values of sorbitol, fructose, glucose and sucrose content in fruits of *Pyrus communis* L. after storage. The asterisk represents significant higher values. Ctr = 0 kg $CaCl_2$/ha; T1 – initial sprays with 0.4 kg $CaCl_2$/ha; T2 – initial sprays with 1.6 kg $CaCl_2$/ha.

4. Discussion

The use of $CaCl_2$ increased Ca content in fruits and promoted a heterogeneous distribution. Calcium distribution in the epidermal region of fruits T1 and T2 (Figure 2) can be related to sprays performed directly on the fruits during production and immersion during the post-harvest phase. The inner Ca (in the central region) accumulation can, to a lesser extent, be related to earlier pulverizations, along with absorption through the roots and subsequent transport through the xylem,

particularly in the early stages of fruit development, where irrigation of xylem vessels is predominant [13]. Besides, with expansion/growth of the fruit, a reduction of Ca can occur (due to dilution of the Ca present in the apoplast), either because the supply of this nutrient via the xylem decreases (due to progressive degradation of the xylem vessels), or due to reduced mobility of this element in the phloem [13, 14]. However, it should be noted that studies on potatoes are examples of the occurrence of Ca redistribution through the phloem, since Ca increases are reported on a crop that, in addition to having a reduced root system, does not have direct exposure of the tubers to foliar sprays [15].

Furthermore, Ca can delay fruit ripening, helping to maintain quality at harvest and during storage. In fact, a study [16] points out that immersing the fruit in $CaCl_2$ solutions, and the consequent presence of this compound in the fruit, may have contributed to preserving firmness values by inducing polymer cross-linking [17]. This process implies that Ca^{2+} can react with the pectic acids in the cell wall (to form calcium pectate), thus strengthening the bond between the constituents of the cell wall [17]. This is especially important for climacteric fruits such as pears, which are prone to loss of firmness because they remain physiologically active during storage [18; 9]. In turn, a lack of this element makes the pulp of pears less consistent, leading to increases in the respiration rate (as well as ethylene release) and accelerating the ripening process of stored fruit, particularly in cold stores [13, 19].

Sugars are the main product of photosynthesis, constituting a source of energy for plants and being necessary in various metabolic pathways (related to stress responses, development of vegetative parts, among others) [20]. In addition, they contribute to the pear's flavor, particularly its sweetness [21], along with its color, texture and nutritional values [22]. In fact, sugars translocated from the leaves to the fruit can have an impact on its growth, and a lack of sugars can compromise the size of the fruit [23]. Although a slight tendency for height decreases at harvest, the absence of significant impacts on fruit size at harvest (Figure 3) is an indicator that the photosynthetic system and therefore the accumulation of sugars in the fruit was not greatly impacted. In addition, diameter sizes for this variety at harvest range between 55 and 75 mm, with average values of 60 and 65 mm [24, 25]. Our values fall within typical commercialized fruits and according to Soares et al. (2001) [26], sizes between 65 and 75 mm corroborate the use of good agricultural practices (such as irrigation and fertilization, among others) and proper orchard installation.

The total amount of sugars in pears normally varies between 6.50 g / 100 g FW and 13.20 g / 100 g FW [10,22,25], and the Rocha pear can contain an average value of 7.6 g of carbohydrates / 100 g. However, as previously mentioned, the amount of carbohydrates in fruits changes with the degree of ripeness and senescence of the

fruit [20]. These changes can thus occur during fruit storage, as metabolic activities such as respiration remain active. In fact, at the beginning of fruit development, polysaccharides (such as starch, cellulose, pectins, hemicellulose) are present, but their degradation into simple sugars (during fruit ripening and senescence) promotes an increase in sweetness [22]. Soluble sugars include glucose, fructose (both monosaccharides) and sucrose (respective disaccharide), while sorbitol is a polyalcohol naturally present in fruits [21]. In our study, fructose is the predominant sugar (Figure 4), which agrees with other studies [27,28] where fructose was the major sugar in different pear varieties.

Lower sucrose values (Figure 4) are linked to the metabolic processes that occur in climacteric fruits during storage, which can lead to an increase in the respective constituent monosaccharides (glucose and fructose) after hydrolysis reactions [22]. Furthermore, contrary to most plants, the main photoassimilate produced by photosynthesis and transported in pome fruits (such as apples or pears) is sorbitol, allowing 60 to 85% of the carbon to be transported, with the remainder being mostly sucrose [29]. Both sugars are transported through the phloem to the fruit tissues. However, the conversion of sorbitol into other sugars (such as glucose, fructose, sucrose or starch) when it reaches the fruit explains why its values can be lower than 5% of the total sugars [23,29]. In fact, as observed in our study (Figure 4), polyols such as sorbitol can account for 0.003 - 6.8 g / 100 g of FW [22] because of said conversion into other sugars during the ripening phase [29]. In turn, sucrose is transported to the fruit from the leaves or is synthesized from sorbitol in the fruit [27]. This sucrose can subsequently be converted into fructose or glucose through the action of invertases, or into fructose and UDP-glucose (uridine diphosphate glucose, corresponding to a glycogen precursor) by sucrose synthase [23].

In summary, Ca is linked to maintenance of fruits attributes at harvest and post-harvest. In addition to preventing diseases and loss of tissue hardness, this element may be related to respiration and ethylene production. This justifies a more prominent action on structures such as the cell wall and membranes which may establish some correlation with sugar content by helping to delay ripening. In turn, deficits in other mineral elements, such as Mg, can also affect the production and transport of photoassimilates to the fruit, which may justify slight fluctuations in the sugar content fruits [30,31]. Positioning of the fruit on the trees or weather and soil conditions or morphology [32], could further be linked to sugar fluctuations in fruits.

Conclusion

Calcium increases were achieved with concentrations of $CaCl_2$, although with heterogeneous distribution. In the epidermal region of sprayed fruits (T1 and T2), it

was related to sprays and immersion during the pre and post-harvest phases. The accumulation in central region, could to a lesser extent, be related to earlier pulverizations. Sugar fluctuations and lower values in sprayed fruits could be due to fruit positioning on the trees or weather and soil conditions or morphology, as well as mineral imbalances on other mineral elements. This suggests that with biofortification approaches, a global analysis of mineral elements variation with increases of target minerals should be performed.

Author Contributions: Conceptualization, C.P., J.R., and F.L.; methodology, J.R., A.E., M.G., and F.C.L.; software, C.C., J.R., A.E., M.G., and R.L.; formal analysis, C.P., I.L., A.M., A.C., D.D., J.R., A.E., M.R., R.L. and I.P.; investigation, C.P., I.L., A.M., A.C., and D.D.; resources, J.R., M.G., P.S.-C., J.N.S., I.P., F.R., M.S., and M.S.; writing—original draft preparation, C.P..; writing—review and editing, C.P.; supervision, F.L.; project administration, F.L.; funding acquisition, F.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by PDR2020-101-030734 and Fundação para a Ciência e Tecnologia I.P. (FCT), UI/BD/150718/2020, through the research centers GeoBioTec (R & D Unit GEOBIOTEC - UID/04035: GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias), CEF (UIDB/00239/2020, https://doi.org/10.54499/UIDB/00239/2020), LIBPhys (UID/FIS/04559/2020 from the FCT/MCTES/PIDDAC) and Associate Laboratory TERRA (LA/P/0092/2020, https://doi.org/10.54499/LA/P/0092/2020).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to thank António Peralta dos Santos and Ribamaior - Produção e Comércio de Frutas Lda for his technical assistance with the PDR2020-101-030734 project.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. FAO. The future of food and agriculture – Trends and challenges. FAO: Rome, Italy, 2017. ISBN 978-92-5-109551-5.
2. Sustainable food and agriculture - Land use in agriculture by the numbers. Available online: https://www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/ (last accessed 15 November 2024).
3. FAO. The state of food and agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. FAO: Rome, Italy, 2021; p. 182. https://doi.org/10.4060/cb4476en. ISBN 978-92-5-134329-6.
4. The Global Goals – 2 Zero Hunger. Available online: https://www.globalgoals.org/goals/2-zero-hunger/ (last accessed 25 November 2024).
5. Ofori, K.F.; Antoniello, S.; English, M.M.; Aryee, A.N.A. Improving nutrition through biofortification–A systematic review. Front Nutr **2022**, 9, 1043655. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043655
6. Ghazanfar, S.; Muhammad Ali, G.; Abid, R.; Farid, A.; Akhtar, N.; Akhtar Batool, N.; Khalid, S.; Okla, M.K.; Al-Amri, S.S.; Alwasel, Y.A.; Hameed, Y. An overview of functional food. IntechOpen **2022**. https://doi.org/10.5772/intechopen.103978
7. Cormick, G.; Belizán, J.M. Calcium intake and health. Nutrients **2019**, 11, 1606. https://doi.org/10.3390/nu11071606
8. Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral - Informação sobre produtos - Pera. Available online: http://www.gpp.pt/index.php/produtos/produtos (last accessed 25 November 2024).

9. Pedro, S.I.; Coelho, E.; Peres, F.; Machado, A.; Rodrigues, A.M.; Wessel, D.F.; Coimbra, M.A.; Anjos, O. Physicochemical fingerprint of "Pera Rocha do Oeste". A PDO pear native from Portugal. Foods **2020**, 9, 1209 (2020). https://doi.org/10.3390/foods9091209
10. PortFir. Available online: https://portfir-insa.min-saude.pt/foodcomp/food?23432 (accessed on 20 March 2025).
11. Híc, P.; Kožíšková, J.; Omastová, P.; Balík, J.; Goliáš, J.; Horák, M. Physiochemical changes of european pear cv. Conference and asian pear cv. Yali during cold storage. Horticulturae **2023**, 9, 378. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030378
12. Pessoa, C.C.; Lidon, F.C.; Daccak, D.; Luís, I.C.; Marques, A.C.; Coelho, A.R.F.; Legoinha, P.; Ramalho, J.C.; Leitão, A.E.; Guerra, M.; et al. Calcium biofortification of Rocha pear fruits: Implications on mineral elements, sugars and fatty acids accumulation in tissues. Sci **2022**, 4, 35. https://doi.org/10.3390/sci4040035
13. Almeida, D. Managing calcium in the soil-plant-fruit system. In Crops: Growth, quality and biotechnology; Dris, R., Ed.; WFL Publisher: Helsinki, Finland, 2005; pp. 448-459.
14. Drazeta, L.; Lang, A.; Hall, A.J.; Volz, R.K.; Jameson, P.E. Causes and effects of changes in xylem functionality in apple fruit. Ann Bot **2004**, 93, 275–282. https://doi.org/10.1093/aob/mch040
15. Coelho, A.R.F.; Lidon, F.C.; Pessoa, C.C.; Daccak, D.; Luís, I.C.; Marques, A.C.; Ramalho, J.C.; Semedo, J.M.N.; Silva, M.M.; Pais, I.P.; Brito, M.G.; Kullberg, J.C.; Legoinha, P.; Simões, M.; Scotti-Campos, P.; Pessoa, M.F.; Reboredo, F.H. (2022). Mineral monitorization in different tissues of Solanum tuberosum L. during calcium biofortification process. Horticulturae **2022**, 8, 1020. https://doi.org/10.3390/horticulturae8111020
16. Antão, R.F.I. Aplicação de nanoemulsões na conservação de pera Rocha. Master`s dissertation, Universidade do Algarve, Portugal, 2019. http://hdl.handle.net/10400.1/15064
17. Rojas-Graü, M.A.; Tapia, M.S.; Martín-Belloso, O. Using polysaccharide-based edible coatings to maintain quality of fresh-cut Fuji apples. LWT - Food Science and Technology **2008**, 41, 139-147. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.01.009
18. Gao, Q.; Tan, Q.; Song, Z.; Chen, W.; Li, X.; Zhu, X. Calcium chloride postharvest treatment delays the ripening and softening of papaya fruit. Journal of Food Processing and Preservation **2020**, 44(8), 1–12. https://doi.org/10.1111/jfpp.14604
19. Soares, J.; Silva, A.; Marques, H. Capítulo IV – Nutrição da pereira rocha. In O livro da pera Rocha – Volume segundo; Associação Nacional de Produtores de Pera Rocha: Cadaval, Portugal, 2003; pp. 129-171.
20. Akšić, M.F.; Tosti, T.; Sredojević, M.; Milivojević, J.; Meland, M.; Natić, M. Comparison of sugar profile between leaves and fruits of blueberry and strawberry cultivars grown in organic and integrated production system. Plants **2019**, 8, 205. https://doi.org/10.3390/plants8070205
21. Magwaza, L.S.; Opara, U.L. Analytical methods for determination of sugar and sweetness of horticultural products-A review. Scientia Horticulturae **2015**, 184, 179-192. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.01.001
22. Yahia, E.M.; Carrilo-López, A.; Bello-Perez, L.A. Chapter 9 - Carbohydrates. In Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables; Yahia, E.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2019; pp. 175-205. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00009-9
23. Yamaki, S. Metabolism and accumulation of sugars translocated to fruit and their regulation. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science **2010**, 79, 1-15. https://doi.org/10.2503/jjshs1.79.1
24. Associação Nacional de Produtores de Pêra Rocha. Available online: http://primofruta.pt/ficheiros/especificacoes/pera_rocha_caderno_especificacoes.pdf (accessed on 21 March 2025).
25. Associação Nacional de Produtores de Pêra Rocha. Available online: http://perarocha.pt/ (accessed on 21 March 2025).
26. Soares, J.; Silva, A.; Alexandre, J. O livro da pera Rocha – Volume primeiro: Contributo para uma produção integrada; Associação Nacional de Produtores de Pera Rocha: Cadaval, Portugal, 2001; p.184. ISBN 972-95557-3-7.
27. Hudina, M.; Štampar, F. Sugars and organic acids contents of european (Pyrus communis L.) and asian (Pyrus serotina REHD.) pear cultivars. Acta Alimentar **2000**, 29, 217–230. https://doi.org/10.1556/aalim.29.2000.3.2
28. Akagić, A.; Oras, A.; Gaši, F.; Meland, M.; Drkenda, P.; Memić, S.; Spaho, N.; Žuljević, S.O.; Jerković, I.; Musić, O.; Hudina, M. A comparative study of ten pear (Pyrus communis L.) cultivars in relation to the content of sugars, organic acids, and polyphenol compounds. Foods **2022**, 11, 3031. https://doi.org/10.3390/foods11193031

29. Atkinson, R.G.; Brummell, D.A.; Burdon, J.N.; Patterson, K.J.; Schaffer, R.J. Chapter 11 - Fruit growth, ripening and post-harvest physiology. In Plants in action, 2nd ed.; Brummel, D.A., Ed. (Chapter editor); Australian Society of Plant Scientists: Melbourne, Australia, 2017. http://plantsinaction.science.uq.edu.au.
30. Zhang B.; Cakmak, I.; Feng, J.; Yu, C.; Chen, X.; Xie, D.; Wu, L.; Song, Z.; Cao, J.; He, Y. Magnesium deficiency reduced the yield and seed germination in Wax Gourd by affecting the carbohydrate translocation. Front Plant Sci **2020**, 11, 797. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00797
31. Chaudhry, A.H.; Nayab, S.; Hussain, S.B.; Ali, M.; Pan, Z. (2021). Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. Int J Mol Sci **2021**, 22, 1819. https://doi.org/10.3390/ijms22041819
32. Yahia, E.M.; Gardea-Béjar, A.; Ornelas-Paz, J.J.; Maya-Meraz, I.O.; Rodríguez-Roque, M.J.; Rios-Velasco, C.; Ornelas-Paz, J.; Salas-Marina, M. Chapter 4 - Preharvest factors affecting postharvest quality. In Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities; Yahia, E.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2019; pp. 99-128. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00004-3

Análisis geométrico teórico de las cubiertas de los invernaderos Mediterráneos

Araceli Peña-Fernández[1*], Diego Luis Valera[1]; Manuel Colón-Reynoso[1] and Pilar Mazuela

[1] CIAIMBITAL Research Centre, Engineering Department, University of Almería, Carretera de Sacramento s/n, 04120 Almería, Spain; mcr535@inlumine.ual.es

[2] Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agronómicas, University of Tarapaca,

Arica 1010072, Chile; pmazuela@academicos.uta.cl

* Correspondence: apfernan@ual.es

Abstract: Los invernaderos desempeñan un papel fundamental en el desarrollo agrícola a nivel mundial. La disposición geométrica de estas estructuras, especialmente de su cubierta, influye directamente en la distribución de la luz solar, la ventilación y la gestión de la condensación. En particular, la forma del techo impacta significativamente en la eficiencia energética y en la acumulación de agua de condensación, la cual, al gotear sobre los cultivos, puede provocar enfermedades y reducir la producción.

Este estudio presenta un programa en Matlab diseñado para definir y analizar la geometría de las cubiertas de los invernaderos, adaptable tanto a estructuras de una sola nave como a múltiples naves. Se evaluaron diversas formas de techo y se determinaron los ángulos a lo largo de su longitud para optimizar el escurrimiento de las gotas de condensación. En las cubiertas de forma ojival, se observó que las gotas de agua adheridas a la superficie resbalan sin causar goteo interno. En contraste, en todas las estructuras con techo semicilíndrico, el goteo afectó más del 50% de la superficie cultivada.

Los resultados obtenidos proporcionan una guía para la selección del tipo de invernadero más adecuado según el clima y la latitud. En climas fríos y latitudes elevadas, una cubierta con mayor inclinación, como el de forma ojival tipo 2l, maximiza la captación de energía solar y minimiza las pérdidas de calor por convección. En climas cálidos, una mayor superficie de cubierta favorece la refrigeración natural, recomendándose el uso de la forma ojival tipo 3l/2. Este estudio ofrece una herramienta valiosa para la toma de decisiones en el diseño y planificación de estructuras agrícolas, contribuyendo a mejorar su sostenibilidad y rendimiento en distintos entornos ambientales.

Keywords: invernadero; eficiencia energetica; cubierta

1. Introduction

El cultivo en invernaderos impulsa la economía de muchas regiones en el mundo. No obstante, para conseguir un desarrollo sostenible de esta agricultura intensiva, las estructuras de los invernaderos deben ser adaptadas al clima donde se instalen [1]. Un diseño adecuado del invernadero permite maximizar la energía proporcionada por el sol y disminuir el goteo sobre los cultivos al objeto de minimizar el consumo energético necesario para mantener el microclima interior, reduciendo el uso de combustibles fósiles.

La forma geométrica de la cubierta influye en la temperatura interior del invernadero [2], siendo el ángulo de ésta, el que permite una mayor captación de radiación solar, dependiendo de la latitud y condiciones climáticas [3] donde se construya. Ángulos altos aumentan o disminuyen la entrada de radiación solar en el invernadero durante el invierno y el verano respectivamente. Anualmente, la cantidad de radiación solar captada por diversas formas geométricas de cubierta, en orden decreciente, es: elíptica, asimétrica, dos aguas, semicircular y gótica [4]. En climas templados y latitudes medias la cubierta curva semicircular capta menos radiación solar anual que las formas a dos aguas y asimétricas, lo que la hace más adecuada para reducir el consumo energético cuando anualmente, las necesidades de refrigeración superan a las de calefacción para mantener las condiciones óptimas en el cultivo [5,6,7]. La eficiencia en la captación de la energía solar de las diferentes formas de cubierta de los invernaderos varía con la estación del año, así en invierno los invernaderos con forma de cubierta semicircular y asimétrico capturan un 6,2% y 5,7% más que los que tienen cubierta a dos aguas [8].

El ángulo de cubierta ha sido objeto de diversos estudios, encontrándose que el más eficiente energéticamente es entre 18º y 30º [4, 9]. El ángulo de la cubierta en un invernadero a dos aguas debería ser 30º [10] en latitudes medias bajas y 45º latitudes medias-altas [11]. Cuando la cubierta es curva, el ángulo debe medirse en cada punto a lo largo de la cubierta [12].

La eficiencia energética del invernadero depende del balance entre la cantidad de radiación solar interceptada por la cubierta y las pérdidas de calor a través de esta. Aproximadamente el 40% del calor se pierde por conducción y convección a través de la superficie exterior del invernadero [13, 8]. En climas fríos, una mayor superficie de cubierta provoca que las pérdidas de calor superen al calor ganado por radiación solar [8], así el consumo en calefacción de un invernadero a dos aguas es un 8% inferior al de un invernadero semicilíndrico [5]. Por otro lado, en climas templados el invernadero con forma gótica es más eficiente energéticamente que los de cubierta con forma a dos aguas y semicilíndrica [14]. La mayor superficie de cubierta del invernadero cuando el clima es frio u árido, aumenta el intercambio de calor con el exterior, dando lugar a un mayor consumo energético en calefacción o refrigeración, mientras que en climas templados favorece la disminución de temperatura [15].

El ángulo de la cubierta tiene también un papel fundamental en la reducción de la condensación que se acumula en la misma y por tanto en la transmisión de la luz a través de ella, así como en el goteo de agua al interior del invernadero [16, 17]. Una gota de agua deslizara cuando el ángulo de la superficie plástica sobre la que sea

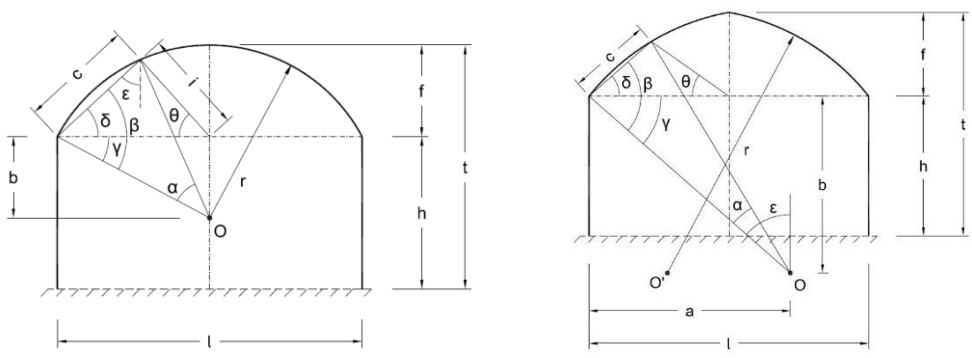
superior o igual a 30º, lo cual es interesante en zonas de escasez de agua dado que puede recogerse el agua de condensación fijada en la cubierta [18, 19].

El objetivo de este trabajo es el estudio de la geometría de diferentes tipos de cubiertas de invernaderos multispan. Se han seleccionado tres formas geométricas (a dos aguas, semicircular y ojival), determinando los parámetros de estas, los cuales disminuyen el riesgo de goteo sobre el cultivo e influyen en su eficiencia energética. Hemos desarrollado en MATLAB (Software version: R2020b Update 7), que permite desarrollar el objetivo anterior cuando varían los parámetros de diseño del invernadero: número de span, altura pilares, altura del arco y ancho de span.

2. Materiales y Métodos

En primer lugar, hemos obtenido las ecuaciones que definen la geometría de una cubierta semicircular y ojival para cualquier altura de arco. Para los estudios que se pretendía, hemos desarrollado un programa en Matlab, donde se implementan las ecuaciones obtenidas. El programa permite, entre otros, obtener la superficie de cubierta del invernadero, a partir de la longitud de la cubierta, así como la superficie de suelo bajo el invernadero. Los parámetros utilizados para variar las dimensiones del invernadero son: altura de cumbrera, t, altura de pilares, h y ancho del span, l. La altura del arco se define como f, siendo f=t-h.

El centro del arco semicilindrico siempre se encuentra sobre el eje de simetría del span y el radio del arco vendrá dado por r=b+f (Figura 1.a). En los arcos ojivales, el centro que define cada uno de los arcos, puede encontrarse en cualquier punto cuyo valor de la coordenada x varía entre 0 y 2l. De este modo, es posible encontrar un valor máximo y mínimo del radio para cada arco a izquierda y derecha [15]. El arco ojival permite definir un arco semicilíndrico cuando los centros se encuentran en (l/2, b_{min}) y un arco de escasa curvatura que podría asemejarse a una línea recta cuando los centros se encuentran en (2l, 0). El ángulo que define la cubierta, θ, se obtiene en función del ángulo del arco, α, y la longitud de cubierta, c, (figura 1b).

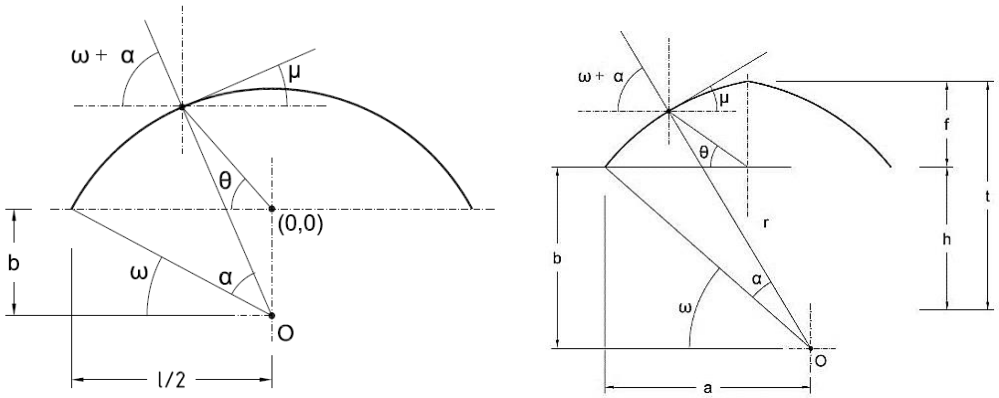


(a) (b)

Figura 1. parámetros geométricos para definir la geometría de cubiertas semicilíndricas (a) y ojivales (b).

Los parámetros que definen la geometría de la cubierta (Figura 2), son el ángulo de inclinación, μ, el cual se define por la pendiente en cada punto de la cubierta; la distancia vertical desde el centro del arco al arranque del mismo, b, y el ancho del span, l. La posición de cada punto a lo largo de la longitud del arco viene definida por su ángulo (ω+α), siendo ω, el arco formado por la distancia vertical desde el centro del arco hasta el arranque del mismo, b, y la mitad del ancho del span,l/2; el ángulo desde el arranque del arco a cualquier punto de la cubierta es α.

El valor mínimo de inclinación de una superficie, μ, sobre la que se encuentra adherida una gota de agua y a partir de la cual comienza a deslizar, ha sido encontrado por diversos autores. Utilizando técnicas de simulación, para gotas sobre superficies inclinados, μ ≥ 30º [21], y mediante experimentación, μ = 30º [20]. Por lo cual, hemos calculado la pendiente a la curva en cada punto, adoptándose que no se produce goteo al interior del invernadero cuando el ángulo, μ ≥ 30º.



(a) (b)

Figura 2. Parámetros que relacionan el arco que define la cubierta, θ, con el centro del arco, O, y el ángulo de la pendiente en cada punto de la curva, μ, para arcos semicilíndricos (a) y arcos ojivales (b).

3. Resultados y Discussion

3.1. Goteo agua de condensación en la cubierta del invernadero.

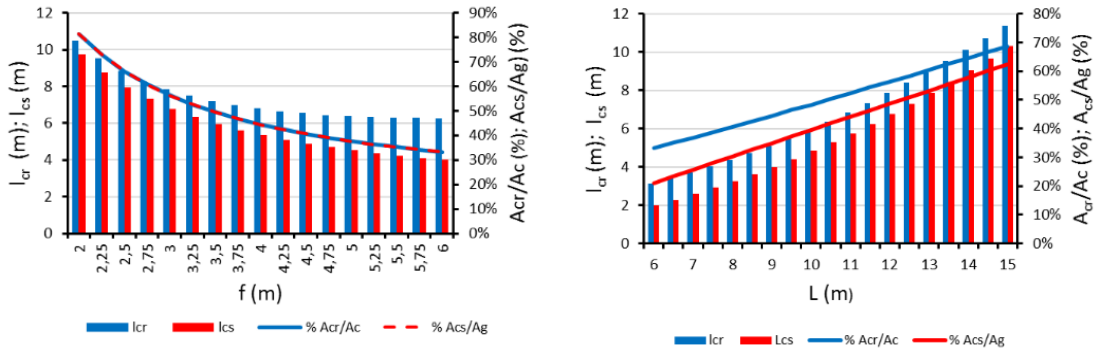
Utilizando el programa desarrollado en Matlab, obtenemos los tramos de longitud de cubierta donde μ<30º y su proyección horizontal, la cual representa el tramo donde caerían las gotas. Los resultados expresan la ubicación y el porcentaje del área cubierta por el invernadero total, y que llamamos “área con riesgo de goteo”. Dado que actualmente la construcción de invernaderos multispan se realiza mayoritariamente para anchos de span de 9 m, aunque la tendencia es aumentar dicho valor para disminuir los obstáculos en el interior y la altura máxima de los arcos, f, se suele utilizar un valor inferior a 4m, la investigación la llevamos a cabo en torno a esto valores.

3.1.1. Análisis de cubierta semicilíndrica.

Calculamos la superficie de cubierta en riesgo de goteo, A_{cr}, la superficie de suelo afectado por el goteo de condensación, A_{cs}, y sus relaciones con el área de cubierta, A_c, y área de cultivo suelo, A_g. Para una longitud de invernadero, p, dichas áreas quedan en función de la longitud de cubierta en riesgo de goteo, l_{cr}, y longitud de suelo afectada por goteo, l_{cs}.

La figura 3a muestra los resultados para 17 alturas de cumbrera que varían desde 2 m a 6 m, manteniendo constante el ancho de span en 9 m. Se observa que la longitud de cubierta y de suelo con riesgo de goteo disminuye un 25% al aumentar la altura de cumbrera de 2m a 3m, un 12% al aumentar de 3m a 4m y sólo un 6,7% cuando la altura del arco es de 5m. No se ha encontrado ninguna altura de cumbrera para la cual la geometría semicilíndrica no supusiese un riesgo nulo de goteo al interior.

Para determinar la influencia del ancho del pórtico, l, se han utilizado 19 cubiertas de invernadero semicilíndrico en las que varía el ancho, l, entre desde 6m a 15 m, manteniendo constante la altura de la cumbrera en f= 3 m. Los resultados muestran que todos los arcos simulados presentan alto riesgo de goteo al interior del invernadero, (Figura. 3b). Tan sólo los anchos entre 6 m y 7,5 m tienen un porcentaje de suelo en riesgo de goteo, A_{cs}, en relación al área de suelo de cultivo, A_g, inferior al 30%.



(a) (b)

Figura 3: Cubierta semicilíndrica: variación de la longitud en riesgo de goteo, l_{cr} y l_{cs}, al aumentar la altura del arco, f, (a) y el ancho del span, l, (b).

3.1.2. Análisis de cubierta ojival.

Al objeto de conjugar resistencia estructural con necesidades agronómicas, hemos calculado el goteo que se produciría desde un span con l=12m y f= 5 m sobre el suelo, esto nos permite acotar la forma de cubierta. Los resultados muestran que los arcos con riesgo nulo de goteo, aquellos cuyos l_{cr} y l_{cs}, corresponden a centros cuya coordenada X está comprendida entre 3l/2 y 2l (Figura 4).

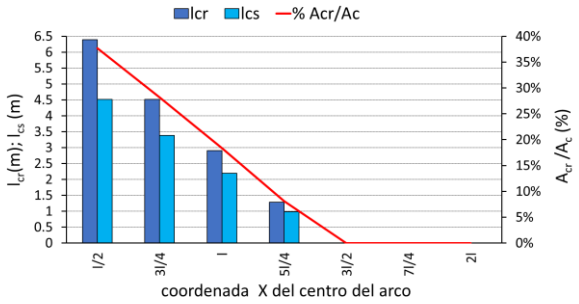


Figura 4. Comportamiento respecto al goteo de condensación de arcos ojivales al variar la coordenada x de los centros de los arcos.

En el invernadero con forma de arco apuntado (ojival), el ángulo del techo, μ, en cada punto de su longitud aumenta a medida que aumenta el radio de los arcos que lo definen. A diferencia del invernadero semicilíndrico, en el arco apuntado es posible encontrar un arco con μ ≥30°en toda su longitud, lo que permite que las gotas de condensación se deslicen hacia los extremos y no goteen en el interior del invernadero. Para X = 2l, obtuvimos el valor máximo, Omax (2l,0), lo que define el máximo radio, y la forma del arco tenía poca curvatura, pareciéndose a un tejado plano de dos vertientes, mientras que para X=l/2 se obtenía una semicircunferencia.

De este estudio preliminar, seleccionamos cuatro formas de arco, (que llamaremos "tipos de arco"), cuyas coordenadas X corresponden a l/2 (semicilíndrico), l y 3l/2 (ojivales) y 2l (a dos aguas). Para cada tipo se estudiaron cuatro alturas de arco, f, y cuatro anchos de span, l,(Tabla 1), lo que hace un total de 68 geometrías de cubierta. Los resultados se muestran para la relación geométrica, f/l, la cual permite distinguir entre diferentes tipologías de arcos [22] y a la que llamamos, β.

Tabla 1. Valores de ancho de span, l, altura del arco, f, y parámetro β

l (m)	f (m)				β= f/l			
9	2,5	3	3,5	4	0,278	0,333	0,389	0,44
11	2,5	3	3,5	4	0,228	0,273	0,318	0,363
13	2,5	3	3,5	4	0,192	0,231	0,269	0,308
15	2,5	3	3,5	4	0,167	0,2	0,233	0,267

Utilizando el programa desarrollado en Matlab, hemos calculado la relación A_{cs}/A_g, siendo A_{cs} el área de suelo sobre la que se produciría goteo, obtenida como la proyección horizontal de A_{cr}, y A_g el área de suelo bajo el invernadero, para cada tipo en función de su relación gométrica β.

A medida que β es más pequeño, el porcentaje de suelo mojado aumenta, para valores de β ≤0,278, todas las formas de cubierta de invernadero producirían goteo

en más de 50% de la superficie de suelo. La forma a dos aguas, tipo 2l, es la que produciría goteo de condensación en mayor área de suelo y la que menos lo haría, sería la cilíndrica, tipo l/2, (Figura. 5). Para valores superiores, β >0,278, el comportamiento respecto al goteo de las diferentes formas de invernaderos se invierte y la superficie de suelo afectada es inferior al 50%, siendo la cubierta a dos aguas la que menos goteo produciría y la que más sería la semicilíndrica.

En el invernadero semicilíndrico el goteo afecta, en todos los casos estudiados, a más del 35% de la superficie de suelo, Ag, mientras que llega a ser nulo para las formas ojival, 3l/2, y a dos aguas, 2l, cuando β >0,389 y β >0,363 respectivamente. Concluimos que sólo en aquellos arcos de menor ancho, l=9m, y mayores alturas, f= 4m y 3,5m no se produce goteo sobre el cultivo.

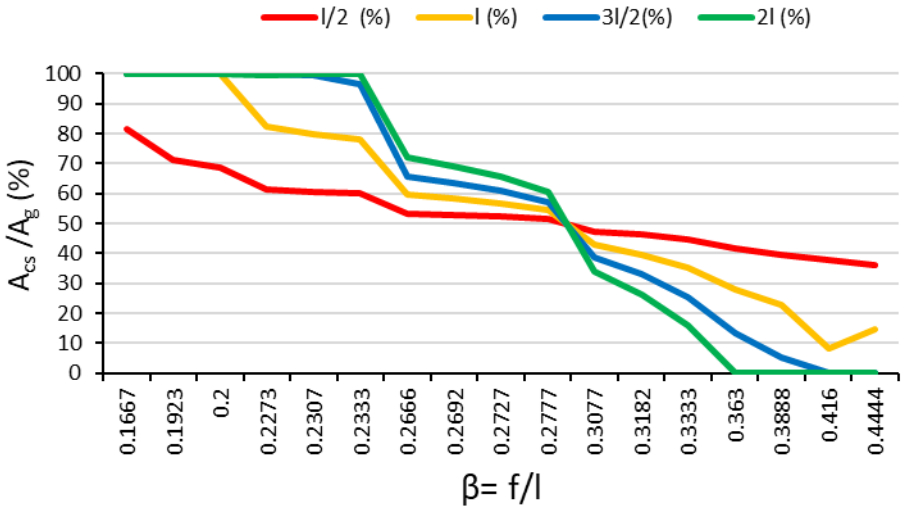
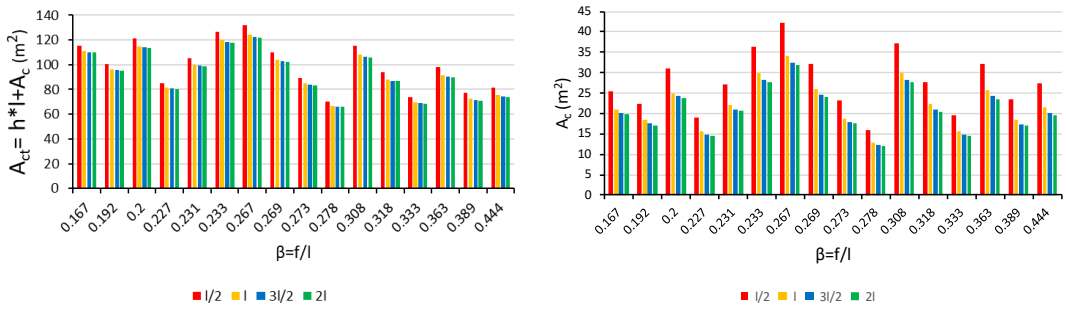


Figura 5. Porcentaje de suelo sobre el que cae goteo de condensación respecto al suelo de cultivo, para todas las formas de cubierta de invernaderos estudiadas

3.2. Influencia del tipo de cubierta en el volumen de aire en el interior del invernadero

El volumen de aire interior se determina en función del número de naves y el largo del invernadero, los cuales consideramos iguales para todos los invernaderos estudiados, lo que nos permite determinar la variación de volumen de unos a otros en función del área transversal del pórtico o span del invernadero, A_{ct}. Hemos comparado las distintas formas de invernadero estableciendo un valor de altura de pilares, h. Para h=6m, se observa que el área total es mayor en el invernadero semicilíndrico, l/2, y menor en el dos aguas, 2l, (Figura 6a). Al comparar el área de cubierta transversal, A_{ct}, (Figura 6b) con el área total (Figura 6a) encontramos que el volumen depende fundamentalmente de la altura de pilares, lo que coincide con otros autores [23].

El volumen de aire interior no guarda relación con el crecimiento de la relación geométrica β. Los tipos de cubierta que minimizan el goteo al interior del invernadero corresponden con aquellos de menor l y mayor f, es decir, con β≥0,363, y el volumen de aire debido a la forma de la cubierta es semejante a aquellos con β≤0,2. Por lo que es posible encontrar relaciones de ángulo de cubierta y ancho de nave que optimicen tanto el deslizamiento de agua de condensación como el volumen de aire en el interior del invernadero, como se observa en la Figura 6a. Así, para todas las alturas de cubierta, el ancho de nave 9m, cumple las dos condiciones y para ancho de nave de 11m lo cumplen las alturas de cubierta de 3,5m y 4m.

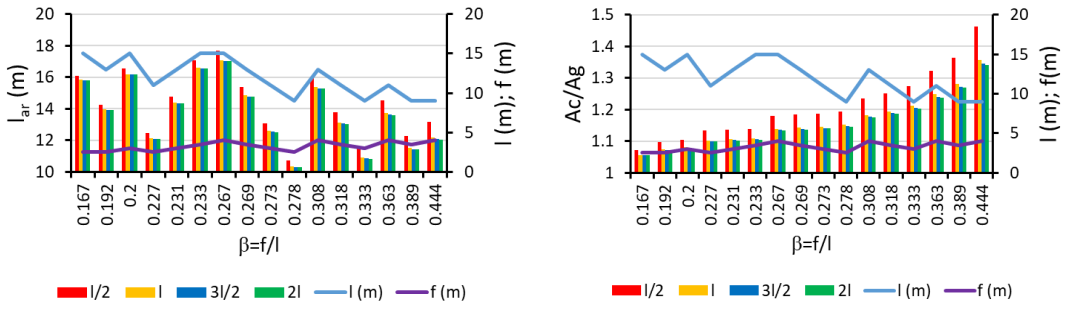


(a) **(b)**

Figura 6. rea transversal (a) y área de cubierta (b) para los invernaderos estudiados

3.3. Influencia del tipo de cubierta en la eficiencia energética del invernadero.

La eficiencia energética depende las pérdidas y ganancia de calor a través de sus recubrimientos exteriores, de forma que minimice el consumo de energía fósil. Los cuatro tipos de invernaderos estudiados (l/2; l, 3l/2 y 2l), no tienen grandes diferencias en el ángulo de la cubierta medido en el arranque del arco, sin embargo, si lo tienen en la superficie de la cubierta, influyendo significativamente en la cantidad de radiación solar recibida y el calor que se pierde a través de ella.



(a) **(b)**

Figura 6. Relaciones entre la superficie de cubierta y su geometría, l_{ar}. (a) y A_c/A_g (b).

Se ha considerado constante la longitud del invernadero, p, por lo que para comparar las superficies de cubierta de las distintas formas geométricas hemos utilizado la longitud del arco, l_{ar}. En general, los resultados muestran que los

invernaderos de cubierta semicilíndrica, tipo l/2, tienen mayor longitud de arco que los ojivales, tipo l y 3l/2, siendo las diferencias entre estos últimos muy pequeñas cuando se comparan para los mismos valores de ancho, l, y alto de arco, f. De acuerdo a esto, encontramos que la cubierta semicircular tiene un 10% más de superficie que el resto de las formas, mientras que la diferencia entre las ojivales es un 0,2 %. Estos porcentajes se reducen a medida que aumenta el ancho de span. Por tanto, dado que captación de energía solar aumenta al aumentar la superficie de cubierta [24], los invernaderos semicilíndricos serían más eficientes, siendo los ojivales de cubierta casi a dos aguas, 2l, los que menos. Sin embargo, se observa que se pueden obtener valores de longitudes de arco próximos entre sí para valores de distintos de ancho (Figura 6a), por lo cual, no se puede afirmar cual es la cubierta más eficiente utilizando la relación β=f/l, ya que esta no muestra crecimiento o decrecimiento cuando lo hace el área de cubierta, A_c.

En áreas donde anualmente, las necesidades de refrigeración superan a las de calefacción, lo que ocurre en latitudes medias-bajas y donde es la ventilación natural el principal método para enfriar el invernadero, adquiere especial relevancia la relación entre el área de cubierta y el área de suelo bajo el invernadero, A_c/A_g. La mayor relación A_c/A_g , llevando asociado un mayor ángulo de cubierta en todos sus puntos, permite una mayor captación de energía solar durante el invierno y menor durante el verano. También la mayor superficie de cubierta permite aumentar el intercambio de calor con el exterior, favoreciendo la bajada de temperatura interior. Por tanto, este tipo de cubierta son las que menos energía requieren anualmente y recomendamos la forma ojival l y anchos de nave menores, l=9 m. Esto resulta interesante en zonas de gran concentración de invernaderos como es la cuenca mediterránea.

Al contrario sucede en climas fríos y latitudes altas, se recomiendan ángulos de cubierta altos para aumentar la captación de energía solar y valores bajos de la relación A_c/A_g, para disminuir las pérdidas de calor. Sera recomendable la forma ojival, tipo 3l/2, con valores de β pequeños, es decir mayores anchos de span, como recomiendan otros autores [8]. Por último, el invernadero más eficiente energéticamente es el que menor superficie exterior en relación a la superficie de suelo cubierto, elevándose hasta un 42% el consumo de energía para calefacción en los invernaderos de un solo span frente a los multitúnel [25]. Por tanto, en climas extremos son recomendables las cubiertas con menor relación A_c/A_g y β y en invernaderos multinave.

5. Conclusiones

El programa desarrollado permite calcular diversos parámetros geométricos de los arcos semicilíndrico y ojival. Variando tanto el ancho de nave, l, como la altura del arco, f, podemos obtener cualquier geometría comprendida entre un arco de radio l/2, semicircunferencia, pasando a ojivales, l y 3l/2, y hasta una superficie plana o triangular, 2l.

Las formas de cubierta ojival permiten deslizar las gotas de agua condensada en la cubierta del invernadero, evitando el goteo al interior. No es posible encontrar una forma semicilíndrica que no produzca goteo de agua de condensación al interior del invernadero.

La captación de radiación solar por la cubierta del invernadero aumenta para valores altos de las relaciones A_c/A_g y de β, lo que se consigue con anchos de nave menores y mayores alturas de arco. De acuerdo con esto, clasificamos los tipos de cubierta estudiados, en orden decreciente en cuanto la eficiencia en la captación de energía solar: tipo l/2, tipo l, tipo 3l/2 y tipo 2l.

Al aumentar el ángulo de la cubierta, aumenta la relación A_c/A_g y también lo hace la demanda de calefacción durante el invierno. Si el ángulo es muy bajo, la carga de nieve que se acumule podría suponer riesgo para la estructura en latitudes septentrionales, recomendándose el ángulo de 25º-30º para permitir el deslizamiento de la nieve.

En climas cálidos y latitudes medias-bajas, las cubiertas con mayor relación A_c/A_g y mayor ángulo en todos sus puntos son las que menos energía requieren anualmente, por tanto, se recomendarían la forma ojival 3l/2 y los menores anchos de nave, 9 m.

Las formas de cubierta ojival tienen menor relación A_c/A_g que la forma semicircular, por lo que disminuyen las pérdidas de energía, especialmente para valores bajos de β. En climas fríos y latitudes altas, se recomienda la forma ojival, l, por tener mayores ángulos en toda que longitud que la forma a dos aguas, 2l, y poca diferencia de superficie total entre ellas, con lo cual aumenta la captación de energía solar y disminuye las pérdidas de calor a través de la cubierta. Son preferibles anchos de span grandes, entre 13m y 15m, y con altura de la más pequeña, 2,5 m.

Author Contributions: Conceptualization, A.P.-F. and P.M.; methodology, A.P.-F. and D.L.V; software, M.A.C.-R.; validation, A.P.-F., P.M. and M.A.C.-R.; formal analysis and investigation, A.P.-F, D.L.V and P.M.; resources and data curation, M.A.C.-R.; writing—original draft preparation and writing—review and editing, A.P.-F. and D.L.V; visualization, P.M.; supervision, project administration, and funding acquisition, A.P-F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The FEDER-Andalucía 2014–2020 operation program. via the research project UAL2020- TEP-A1986, funded this research.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data that support this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors wish to express their gratitude to the Junta of Andalucia, University of Almería (Spain) and University of Tarapaca (Chile) for their support throughout the development of this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Referencias Bibliograficas

1. Mendoza-Fernández, A.J.; Peña-Fernández, A.; Molina, L.; Aguilera, P.A. The role of technology in greenhouse agriculture: Towards a sustainable intensification in campo de Dalías (Almería, Spain). *Agronomy* **2021**, *11*, 101.
2. Sethi, V.P. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Sol. Energy* **2009**, *83*, 21–38.
3. Singh, R.D.; Tiwari, G.N. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis. *Energy* **2010**, *35*, 2367–2373.
4. Çakir, U.; ¸Sahin, E. Using solar greenhouses in cold climates and evaluating optimum type according to sizing, position and location: A case study. *Comput. Electron. Agric*. **2015**, 117, 245–257.
5. Choab, N.; Allouhi, A.; Maakoul, A.E.; Kousksou, T.; Saadeddine, S.; Jamil, A. Effect of Greenhouse Design Parameters on the Heating and Cooling Requirement of Greenhouses in Moroccan Climatic Conditions. *IEEE Access* **2021**, *9*, 2986–3003.
6. Tanaka, H.; El-Maghlany, W.M.; Teamah, M.A. Analytical study on solar energy absorbed on elliptic curved collector. *Sol. Energy* **2015**, *115*, 667–679.
7. Ghani, S.; El-Bialy, E.M.; Bakochristou, F.; Rashwan, M.M.; Abdelhalim, A.M.; Ismael, S.M.; Ben, P. Experimental and numerical investigation of the thermal performance of evaporative cooled greenhouses in hot and arid climates. *Sci. Technol. Built Environ*. **2020**, *26*, 141–160.
8. Ahamed, M.S.; Guo, H.; Tanino, K. Energy-efficient design of greenhouse for Canadian Prairies using a heating simulation model. *Int. J. Energy Res*. **2018**, *42*, 2263–2272.
9. Sharshir, S.W.; Eltawil, M.A.; Algazzar, A.M.; Sathyamurthy, R.; Kandeal, A.W. Performance enhancement of stepped double slope solar still by using nanoparticles and linen wicks: Energy, exergy and economic analysis. *Appl. Therm. Eng*. **2019**, *174*, 115278.
10. Soriano, T.; Montero, J.I.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; Antón, A.; Hernández, J.; Morales, M.I.; Castilla, N. A Study of direct solar radiation transmission in asymmetrical multi-span greenhouses using scale models and simulation models. *Biosyst. Eng*. **2004**, *88*, 243–253.
11. Esmaeli, H.; Roshandel, R. Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions. *Renew. Energy* **2020**, *145*, 1255–1265.
12. Huang, L.; Deng, L.; Li, A.; Gao, R.; Zhang, L.; Lei, W. Analytical model for solar radiation transmitting the curved transparent surface of solar greenhouse. *J. Build. Eng*. **2020**, 32, 101785.
13. Kumari, N.; Tiwari, G.N.; Sodha, M.S. Performance Evaluation of Greenhouse having Passive or Active Heating in Different Climatic Zones of India. *Agric. Eng. Int. CIGR E-J.* **2007**, *9*, 1–19.
14. Rasheed, A.; Kwak, C.S.; Kim, H.T.; Lee, H.W. Building energy and simulation model for analyzing energy saving options of multi-span greenhouses. *Appl. Sci*. **2020**, *10*, 6884.
15. Peña-Fernández, A.; Colón-Reynoso, M.A.; Mazuela, P. Geometric Analysis of Greenhouse Roofs for Energy Efficiency Optimization and Condensation Drip Reduction. *Agriculture* **2024**, *14*, 216.
16. Cemek, B.; Demir, Y. Testing of the condensation characteristics and light transmissions of different plastic film covering materials. *Polym. Test*. **2005**, *24*, 284–289.
17. Pollet, I.V.; Pieters, J.G. PAR transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. *Agric. For. Meteorol*. **2002**, *110*, 285–298.

18. Beysens, D.; Milimouk, I.; Nikolayev, V.; Muselli, M.; Marcillat, J. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: A study to improve water yield. *J. Hydrol*. **2003**, *276*, 1–11.
19. Maestre-Valero, J.F.; Ragab, R.; Martínez-Alvarez, V.; Baille, A. Estimation of dew yield from radiative condensers by means of an energy balance model. *J. Hydrol*. **2012**, 460–461.
20. Venkateshan, D.G.; Tafreshi, H.V. Modelling droplet sliding angle on hydrophobic wire screens. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **2018**, *538*, 310–319.
21. Serrano-López, R.; Urruchi-Rojo, J. R.; Martínez-Martínez, J. A. The shallow arch: A step towards bridges styling in the early 19th century. *Eng. Struct*. **2017**, 167, 84–95.
22. Vanthoor, B. H. E.; van Henten, E. J.; Stanghellini, C.; de Visser, p. H. B. A methodology for model-based greenhouse design: Part 3, sensitivity analysis of a combined greenhouse climate-crop yield model. *Biosyst. Eng.* **2011**, *110(4)*, 396–412.
23. Chen, J.; Ma, Y.; Pang, Z. A mathematical model of global solar radiation to select the optimal shape and orientation of the greenhouses in southern China. *Sol. Energy*. **2020,** *205*, 380–389.
24. Djevic M.; Dimitrijevic, A. Energy consumption for different greenhouse constructions. *Energy*. **2009**. 34, 9, 1325–1331.

PARTE 9

CONSTRUÇÕES RURAIS

CONSTRUCCIÓN RURAL

Índice

Efectos de la forma y el tamaño de las partículas sobre las propiedades mecánicas y el flujo de materiales granulares en simulaciones DEM 965

Reducción de cuantías mecánicas en estructuras de hormigón armado con elementos aligerados, en particular con yeso vibro comprimido. 979

Comparativa de costes de los bloques de yeso por sistema de vibro compresión con relación a los materiales empleados en tabiquería. 989

Metodología para la valoración de edificios agrarios 1003

Estudio de la fricción entre piezas de madera microlaminada de eucalipto (Eucalyptus globulus Labill.) 1016

Life Cycle Assessment of Mortars with Waste Addition 1027

ANÁLISIS RESISTENTE DE VIALES DE JABRE ESTABILIZADOS CON DIFERENTES CEMENTOS 1037

Determinación de las propiedades mecánicas de pellets de plástico 1051

Efectos de la forma y el tamaño de las partículas sobre las propiedades mecánicas y el flujo de materiales granulares en simulaciones DEM

Ana Grande-Gutiérrez[1]; Eutiquio Gallego[1]; Francisco Ayuga[1]; José María Fuentes[1,*]

1 Grupo de investigación EIPIRMA. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid (España).

* Correspondence: jm.fuentes@upm.es

Abstract: The Discrete Element Method (DEM) has become a promising tool for modelling granular materials because of its capacity to simulate particles and their interactions individually. Particle shape and size significantly determine the mechanical behaviour and flow pattern of the bulk material. The use of spherical particles in DEM simulations is common, given their relative simplicity in terms of physical modelling and reduced computational cost, although the simplification could lead to inaccurate results to predict forces, packing patterns and flow behaviour. In addition, particle size distribution also has a significant impact on the type of flow, discharge mass flow rate, segregation and shear band location, as well as on the distribution of wall pressures. The discharge of a model silo with corrugated steel walls and a centred hopper filled with pinewood pellets was numerically simulated using three different particle models: (i) spherical; (ii) monodisperse cylindrical; and (iii) polydisperse cylindrical. The paper analyses the effect on the distribution of pressures on the silo walls, the effective wall friction coefficient and the discharge mass flow rate, comparing the numerical results with experimental measurements. The results of the work indicate that particle size and shape play a limited role in determining wall pressures, but a major effect on flow patterns.

Keywords: Discrete Element Method; DEM; simulation; silo; particle shape; corrugated walls; pressures; mass flow rate.

1. Introducción

Los silos metálicos de chapa ondulada de acero son una solución ampliamente extendida para el almacenamiento de cereales, piensos y otros productos agrícolas por su versatilidad, fácil montaje y coste moderado. El comportamiento estructural de los silos está profundamente influido por las propiedades mecánicas de los materiales granulares almacenados en ellos, que determinan, entre otras cuestiones, el patrón de flujo del material, el rozamiento entre las partículas y la distribución de tensiones en las paredes del silo [1].

La forma y el tamaño de las partículas son factores importantes que influyen en las propiedades mecánicas del material granular y en el patrón de flujo durante la descarga [2-4]. En general, las partículas con formas no esféricas suelen dar lugar a fuerzas de interacción más complejas, patrones de agrupamientos irregulares y flujos difíciles de predecir [5]. Asimismo, el tamaño de las partículas ejerce un impacto significativo en la densidad aparente, el tipo de flujo, el caudal de descarga, la segregación y la localización de las zonas de corte [6-8], aspectos relevantes para poder determinar la distribución de presiones ejercidas por el material almacenado sobre las paredes de los silos y poder optimizar los procesos de descarga.

El Método de los Elementos Discretos (DEM) se ha convertido en los últimos años en una potente herramienta para modelizar sistemas granulares gracias a su capacidad para simular individualmente el movimiento y las interacciones de las partículas y de éstas con las paredes [9]. Su éxito depende en gran medida de la exactitud a la hora de simular las partículas de la forma más realista posible. El empleo de partículas esféricas ofrece como ventajas la relativa sencillez para modelizar físicamente los contactos y un menor coste computacional. Sin embargo, la precisión en los resultados obliga con frecuencia al empleo de modelos más sofisticados, basados en multiesferas, esferocilindros, elipsoides o poliedros, entre otros [10-13].

Distintos autores han analizado experimental y numéricamente el efecto de la forma y el tamaño de las partículas en el rozamiento y el patrón de flujo en silos de paredes lisas. El trabajo de Höhner et al. [14] sobre la descarga de pellets de madera de una tolva halló diferencias significativas en términos de densidad aparente, velocidad de descarga, patrón de flujo y coeficiente de rozamiento partícula-pared al utilizar multiesferas o partículas poliédricas [14]. Asimismo, Xu et al. [15] hallaron una mayor fracción sólida y tasa de descarga con partículas elipsoidales frente a esféricas. La distribución por tamaños de las partículas condiciona asimismo el flujo y de las fuerzas internas en un medio granular [15]. El estudio numérico desarrollado por Govender et al. [16] sobre el caudal de descarga de sistemas de partículas monodispersos y polidispersos con una fracción de empaquetamiento aproximada reveló que la tasa másica de descarga para las mezclas polidispersas se situaban entre los correspondientes a sistemas monodispersos compuestos por las partículas de menor y mayor tamaño [16]. Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado estudios exhaustivos sobre estos efectos con materiales almacenados en silos de paredes onduladas.

El propósito de este trabajo es analizar numéricamente la descarga de un silo con paredes de chapa ondulada y tolva centrada, que contenga pellets de madera de pino, utilizando tres modelos de partículas diferentes: (i) esféricas; (ii) cilíndricas

monodispersas; y (iii) cilíndricas polidispersas, con el objetivo de comparar la densidad aparente, el tiempo total de descarga, el caudal másico, la distribución de presiones en las paredes del silo y el coeficiente de rozamiento efectivo. Para validar los modelos de elementos discretos se ha utilizado un silo experimental convenientemente instrumentado con células de carga.

2. Material y métodos

2.1. Ensayos experimentales

Los ensayos experimentales realizados para validar los modelos numéricos se llevaron a cabo en un silo a escala formado por un cuerpo vertical de sección transversal cuadrada de 0,45 x 0,45 m^2 y altura de 0,75 m y una tolva centrada de 0,175 m de altura con boca de salida cuadrada de 0,06 x 0,06 m de sección (Figura 1). Las paredes laterales del silo están construidas con chapa ondulada de acero galvanizado, con una longitud de onda de 75 mm y una profundidad de 13 mm. Las paredes frontal y trasera del silo se fabricaron con polimetilmetacrilato (PMMA) transparente para poder observar el flujo de material durante la descarga. El cuerpo del silo se apoya en su nivel superior sobre 4 sensores de carga de tipo viga, que permiten registrar de forma continua la fuerza de rozamiento sobre las paredes del módulo vertical. La tolva, por su parte, está soportada igualmente por 4 sensores de carga que permiten registrar en cada momento el peso del material granular que gravita sobre ella.

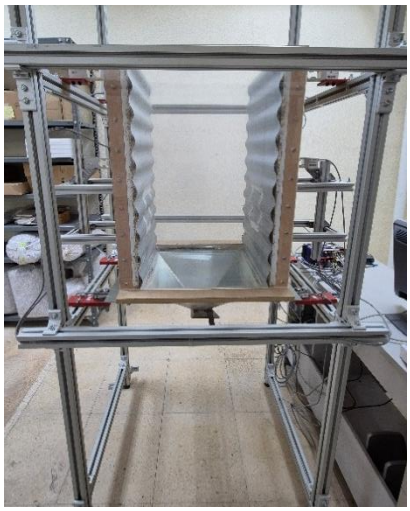


Figura 1. *Silo a escala para la validación experimental del modelo numérico*

El material granular empleado en los ensayos fueron pellets cilíndricos de madera de pino, de 6 mm de diámetro (±0,1 mm) y longitud variable (14,7±6 mm), cuyas propiedades físicas indicadas por el fabricante (Nova Lenha, Lda.) se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. *Propiedades mecánicas de los pellets empleados en la investigación [9].*

Variable	Valor
Peso específico [kN/m^3]	6,8
Humedad [%]	6,5
Valor calórico medio [kJ/kg]	18
Residuos (cenizas) [%]	0,50

Las propiedades mecánicas de los materiales y las propiedades de interacción partícula-partícula y partícula-pared necesarias para las simulaciones DEM, previamente determinadas por los autores [9], se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. *Propiedades mecánicas y de interacción entre materiales [9]*

Material	Densidad de partícula (kg/m^3)	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de restitución	Coeficiente de rozamiento
Pellets de madera	1100	70,68	0,35	0,62	0,425
Acero galvanizado	7860	2,1x10^5	0,3	0,5	0,3
Polimetilmetacrilato (PMMA)	1190	3149	0,4	0,67	0,3

El proceso de llenado del silo se realizó de forma centrada desde arriba, asegurándose de que el material caía a un ritmo constante en torno a 1,5 kg/s. Una vez completado el llenado, se dejó reposar el material granular durante 5 minutos antes de iniciar su descarga en caída libre a través de la boca de salida. Con el fin de garantizar la repetibilidad de las pruebas experimentales y poder llevar a cabo un análisis estadístico de los resultados, se efectuaron siete repeticiones del ensayo.

2.2. Modelos numéricos

Para desarrollar el modelo numérico se empleó el software EDEM 2022, basado en el método de los elementos discretos (DEM). Se utilizó el modelo de contacto de Hertz-Mindlin, con amortiguación viscosa y deslizamiento tangencial en los contactos para simular las fuerzas que se producen durante la colisión entre las partículas o entre éstas y las paredes del silo. Las partículas se generaron aleatoriamente en la parte superior del silo a una velocidad de llenado constante similar a la utilizada en los ensayos experimentales (1,5 kg/s). Antes de iniciar el proceso de descarga se comprobó la condición estática del sistema, verificando que la energía cinética de las partículas fuera inferior a 10^{-7} J. La integración se llevó a cabo utilizando el método de Euler, adoptando un paso de tiempo entre iteraciones de 1,3x10^{-5} s para garantizar la robustez de los cálculos y evitar fluctuaciones excesivas en los resultados [17]. Los cálculos numéricos se llevaron a cabo

utilizando la capacidad computacional del superordenador Magerit de la UPM que dispone de 252 procesadores, con un total de 5456 núcleos de proceso y 1.44 TB de memoria RAM.

En la modelización de los pellets de madera de pino se utilizaron tres modelos de partículas diferentes: (i) Cada partícula se representó como una única esfera del diámetro igual a 92.6 mm, de forma que su volumen equivalente (416 mm^3) coincida con el de un pellet cilíndrico de dimensiones medias; (ii) distribución monodispersa de pellets formados por 6 esferas de 6 mm de diámetro y longitud del conjunto de 15 mm; y (iii) distribución polidispersa utilizando el método de las multiesferas con partículas de longitudes comprendidas entre 8.6 y 34 mm, formadas por un número de esferas variable comprendido entre 4 y 13 (Figura 2).

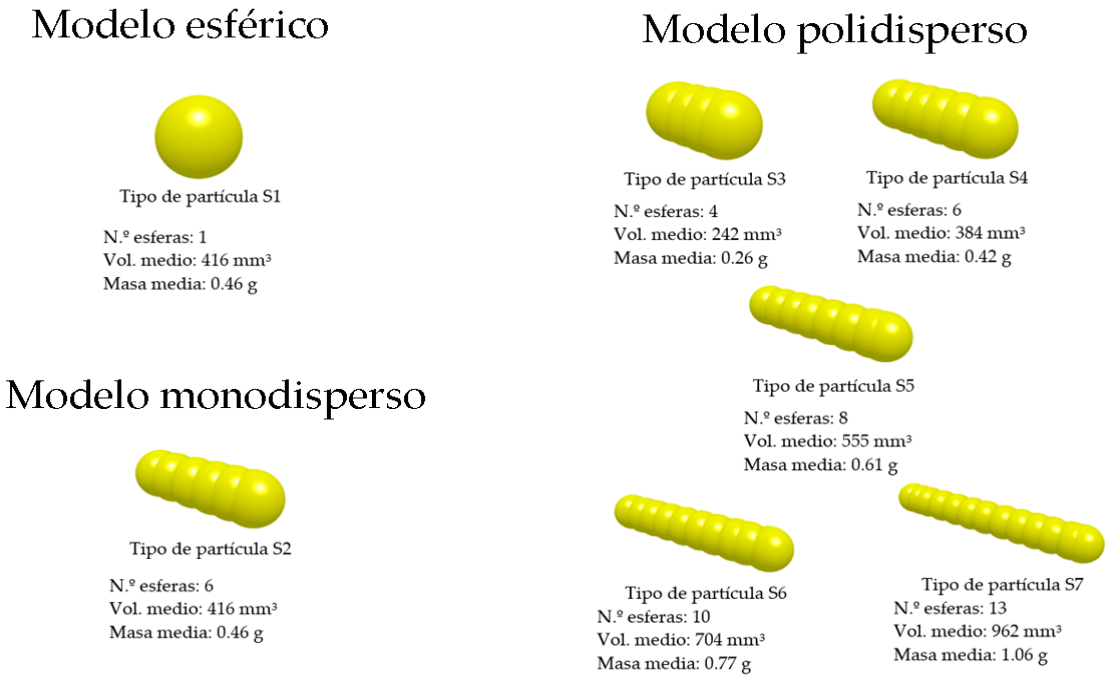


Figura 2. *Partículas utilizadas en las simulaciones numéricas*

2.3. Validación de los modelos numéricos

Para validar los tres modelos DEM desarrollados, se compararon los resultados obtenidos en cada uno de ellos con los datos experimentales considerando la densidad aparente del material granular, el tiempo total de descarga y el caudal másico promedio (Q) como parámetros de comparación. Como se muestra en la Tabla 3, la densidad aparente presenta una desviación comprendida entre el 2.82% y el 4.6% respecto al valor medio determinado en la prueba experimental, con la mayor diferencia observada en el modelo polidisperso. En cuanto al caudal másico de descarga, el modelo esférico sobreestima el valor medido experimentalmente en un 41.7%, mientras que los modelos monodisperso y polidisperso presentan

desviaciones de menor magnitud (del 9.85% y 1.5%, respectivamente). Esta diferencia en el caudal másico promedio se refleja asimismo en el tiempo necesario para la descarga completa del silo, siendo el modelo cilíndrico monodisperso es el que mejor se ajusta a la prueba experimental, con una diferencial de 3.71%, seguido del cilíndrico polidisperso (6.2%), mientras que el modelo esférico subestima significativamente este tiempo en un 25.7%.

Tabla 1. *Comparación de los valores medios de diferentes parámetros entre simulaciones numéricas y prueba experimental*

Parámetros	Prueba experimental	Esférico		Monodisperso		Polidisperso	
		DEM	Diferencia	DEM	Diferencia	DEM	Diferencia
Densidad aparente	680	699.17	2.82%	703.48	3.45%	711.56	4.6 %
Tiempo total de descarga (s)	215.6	160.2	25.7 %	207.6	3.71%	229	6.2 %
Caudal másico de descarga (kg/s)	0.477	0.676	41.7 %	0.524	9.85%	0.47	1.5 %

3. Resultados y discusión

3.1. Eficiencia computacional de las simulaciones DEM

La eficiencia computacional de las simulaciones DEM varía significativamente en función del modelo de partícula utilizado. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos, donde se observa que la energía cinética al final del llenado, aunque de valor muy reducido en todos los casos, es considerablemente menor en el modelo esférico, con un valor de 4.091×10^{-9} J, en comparación con los otros modelos de partículas cilíndricas, que presentan valores considerablemente más elevados (6.294×10^{-8} J en el monodisperso y 7.897×10^{-8} J en el polidisperso).

El número total de partículas generadas necesarias también varía en los distintos modelos, siendo mayor en el modelo polidisperso (269.499), seguido del modelo esférico (234.496) y el monodisperso (230.379). Esta diferencia influye directamente en el tiempo computacional de cálculo y en el consumo de memoria para almacenar las simulaciones, ya que un mayor número de partículas implica una mayor cantidad de datos almacenados y procesados en cada iteración. Como consecuencia, el modelo polidisperso presenta el mayor consumo de memoria, alcanzando 209 GB; seguido del monodisperso con 173 GB, mientras que el modelo esférico requiere significativamente menos recursos, con 112 GB. Respecto al tiempo computacional, durante la fase de llenado, el modelo esférico es el más eficiente con 2.92 h,

mientras que los modelos cilíndricos requieren más tiempo, aumentando en un 39% en el monodisperso (4.06h) y en un 59% en el polidisperso (4.63 h). En la fase de vaciado, los tiempos computacionales son de 8.75 h para el modelo esférico, 7.62 h para el monodisperso y 16.91 h para el polidisperso. Como resultado, el tiempo total de la simulación varía en función del modelo de partícula, siendo 11.67 h en el esférico, 11.68 h en el monodisperso y 21.54 h en el polidisperso.

Estos resultados reflejan cómo la complejidad a la hora de definir formalmente las partículas influye en la eficiencia computacional, con el modelo polidisperso mostrando el mayor coste en términos de tiempo y memoria, mientras que el modelo esférico es el más eficiente, aunque con posibles limitaciones en la representación realista del comportamiento del material granular.

***Tabla 2**. Resultados de los parámetros computacionales*

Parámetros computacionales	Esférico	Monodisperso	Polidisperso
Energía cinética (J) al final del llenado	4.091×10^{-9}	6.294×10^{-8}	7.897×10^{-8}
Número de partículas	234.496	230.379	269.499
Espacio de memoria necesario para almacenar los resultados (GB)	112	173	209
Tiempo computacional llenado (h)	2.92	4.06	4.63
Tiempo computacional vaciado (h)	8.75	7.62	16.91
Tiempo computacional total (h)	11.67	11.68	21.54

3.2. Caudal másico de descarga

El caudal másico (Q) es un parámetro fundamental en la caracterización del proceso de descarga de silos, ya que influye directamente en la eficiencia del vaciado, el grado de compactación del material y el número de contactos entre las partículas. La Figura 3 muestra la evolución temporal de Q (kg/s) para los tres modelos DEM analizados (esférico, monodisperso y polidisperso) permitiendo evaluar sus diferencias en el flujo del material. El modelo esférico presenta el mayor caudal másico durante la mayor parte de la descarga, con un comportamiento notablemente estable y una curva prácticamente lineal, sin fluctuaciones significativas. Esto sugiere un flujo más uniforme debido a la menor fricción interna entre partículas y la ausencia de restricciones geométricas asociadas a la orientación.

Por otro lado, los modelos monodisperso y polidisperso muestran una evolución del caudal con mayores oscilaciones en el tiempo, lo que indica una mayor variabilidad en el flujo del material. Estas fluctuaciones pueden atribuirse a la

orientación de las partículas cilíndricas y a los cambios en la compactación local dentro del silo durante la descarga. En general, los resultados indican que la forma y la distribución de tamaños de partícula influyen significativamente en la estabilidad del caudal y en la duración del vaciado. Mientras que el modelo esférico presenta un flujo más constante, pero con una sobrestimación del caudal, los modelos cilíndricos presentan fluctuaciones que reflejan una interacción más compleja entre las partículas y de éstas con las paredes del silo.

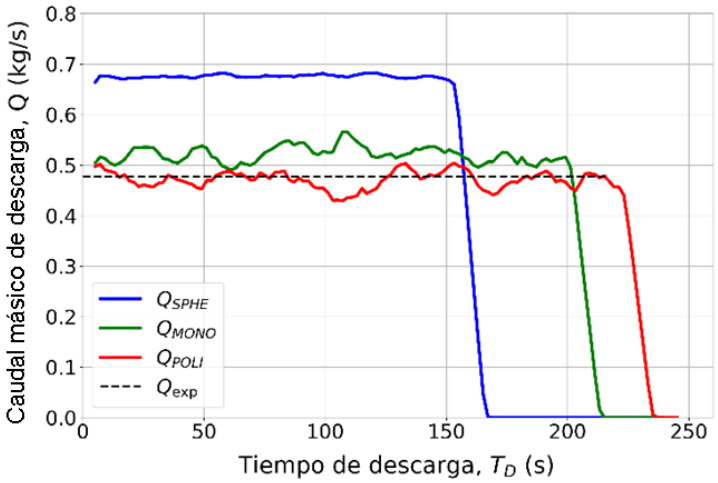


Figura 3. *Evolución del caudal másico de descarga (Q) a lo largo del tiempo*

3.3. Presiones normales

En la figura 4 se muestra la evolución de las presiones normales en las paredes del silo en cuatro instantes diferentes: final del llenado, inicio de la descarga (0%) y 25% de la descarga y 50% de la descarga. Las curvas obtenidas no difieren en exceso, si bien la distribución de presiones en el cuerpo del silo para el modelo con partículas esféricas muestra una curva algo más uniforme y redondeada a lo largo de la altura durante la descarga. Esto indica una transmisión de esfuerzos más homogénea, probablemente debido a la menor capacidad de interbloqueo de las partículas esféricas, lo que facilita su reorganización interna y la disipación de esfuerzos hacia las paredes del silo. Por el contrario, en los modelos con partículas cilíndricas multiesféricas (monodisperso y polidisperso), la distribución de presiones presenta picos de presión ligeramente más pronunciados, lo que sugiere una mayor resistencia interna del material debido a un mayor número de contactos entre partículas y la formación de estructuras interbloqueadas, lo que provoca concentraciones localizadas de presión.

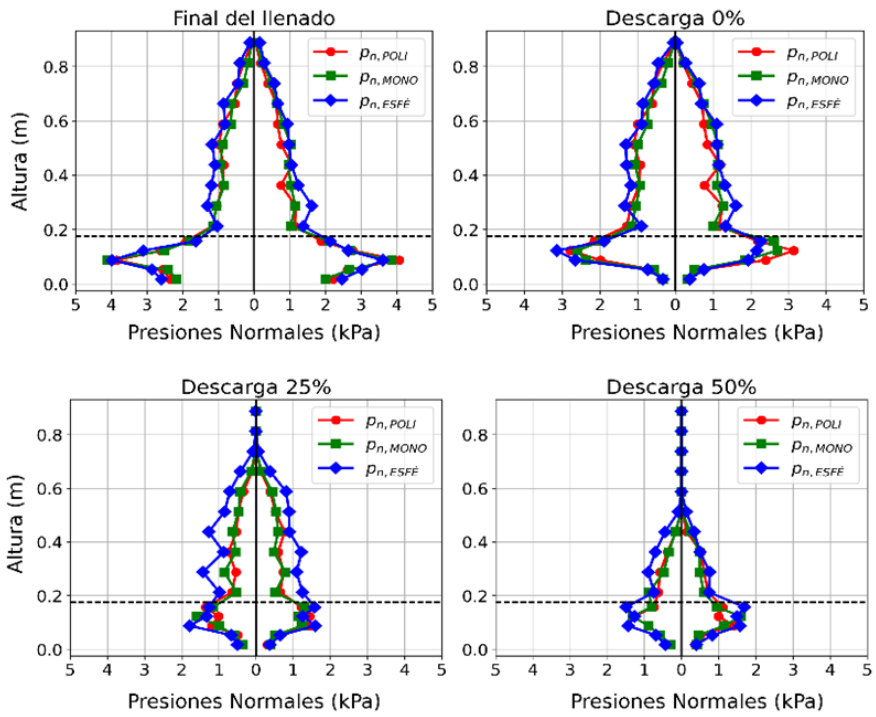


Figura 4. *Evolución de las presiones normales en las paredes del silo al final del llenado y durante la descarga (0%, 25% y 50%)*

3.3. Presiones tangenciales

En la Figura 5 se presenta la distribución de las presiones tangenciales en las paredes del silo en los mismos instantes de tiempo indicados en el apartado anterior. Al final del llenado los perfiles de presión tangencial presentan una distribución similar y simétrica en todos los modelos, con valores máximos en la zona central del silo y de la tolva. Los modelos cilíndricos multiesféricos (mono y polidisperso) registran mayores oscilaciones en la presión respecto al modelo esférico, lo que sugiere una mayor resistencia al movimiento relativo entre partículas.

Durante la descarga, las presiones tangenciales disminuyen gradualmente en todos los modelos, a medida que el material fluye hacia el exterior. Nuevamente, en los modelos multiesféricos se mantienen fluctuaciones más marcadas, lo que indica una estructura interna del material con mayor resistencia al flujo. En contraste, el modelo esférico presenta una distribución más uniforme y estable a lo largo del proceso de vaciado, indicando una menor resistencia y transmisión de esfuerzos más homogéneos dentro del silo. Estos resultados evidencian que la forma y distribución de las partículas influyen directamente en la evolución de las presiones tangenciales dentro del silo, afectando la estabilidad del flujo y la redistribución de esfuerzos durante la descarga.

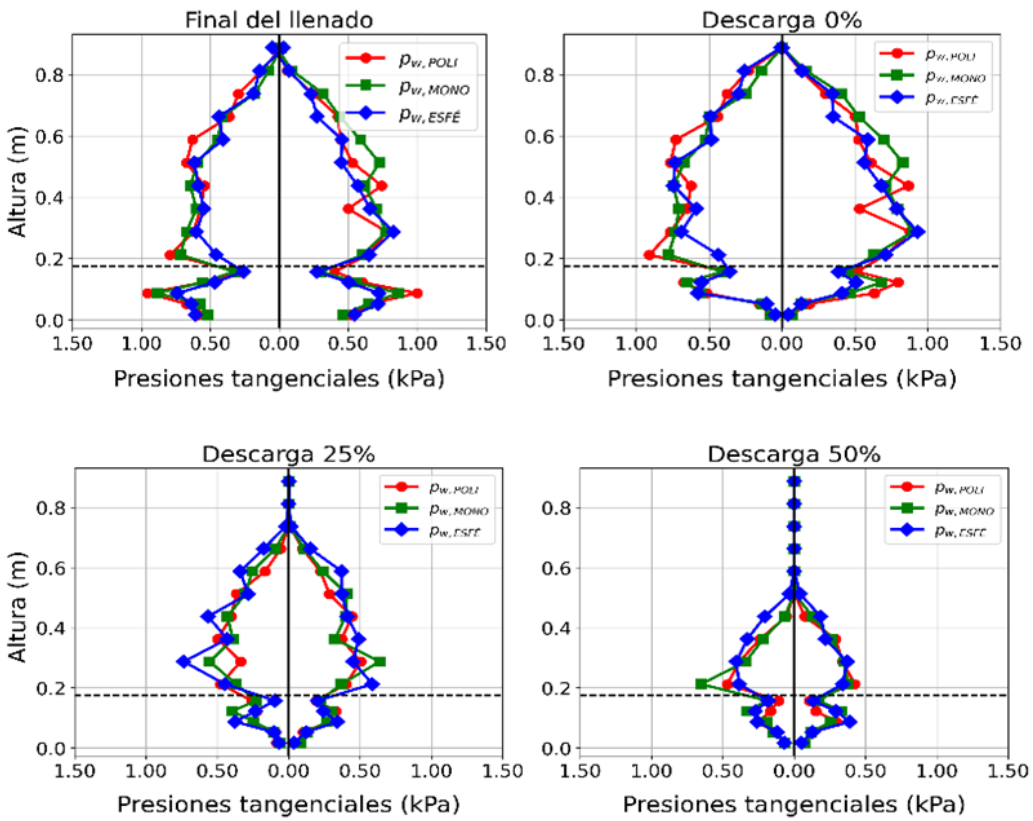


Figura 5. *Evolución de las Presiones Tangenciales: final del llenado y durante la descarga (0%, 25% y 50%)*

3.5. Rozamiento efectivo en las paredes

El coeficiente de rozamiento efectivo (μ_{eff}) es un parámetro fundamental para evaluar la interacción entre el material granular y las paredes del silo. En la Figura 6, se presentan los valores obtenidos para los tres modelos de partículas simulados el cuerpo del silo (pared de chapa ondulada) y en la tolva (pared de chapa lisa).

En el cuerpo del silo, los valores medios de μ_{eff} muestran diferencias significativas entre los modelos DEM analizado. El modelo esférico presenta el menor coeficiente de rozamiento (μ_{eff} = 0.44), lo que sugiere una menor resistencia al movimiento del material sobre la chapa ondulada. En contraste los modelos monodisperso y polidisperso presentan valores de rozamiento efectivo significativamente más altos, (0.67 y 0.64, respectivamente), lo indica que las partículas cilíndricas generan una mayor fricción con la superficie ondulada, debido fundamentalmente al mayor interbloqueo y resistencia al deslizamiento entre partículas. Además, se observa que la variabilidad en los valores de μ_{eff} es mayor en los modelos monodisperso y polidisperso en comparación con el esférico, lo que sugiere una mayor heterogeneidad en la distribución de fuerzas de rozamiento sobre las paredes del silo.

En la tolva, el comportamiento de μ_{eff} es diferente debido que sus paredes son de chapa lisa, siendo los valores del coeficiente de rozamiento menores en comparación con los obtenidos en el cuerpo del silo. El modelo esférico presenta el coeficiente más bajo (μ_{eff} = 0.19), seguido por el polidisperso (μ_{eff} = 0.21) y el monodisperso, que alcanza el mayor valor (μ_{eff} = 0.24). Esto indica que la forma cilíndrica de las partículas sigue contribuyendo a una mayor fricción con la superficie lisa, aunque en menor medida que en la chapa ondulada del cuerpo del silo. Los resultados confirman que la geometría de las partículas influye significativamente en la fricción del material granular con las paredes del silo. El estudio de este comportamiento es crucial, ya que el mayor rozamiento en las paredes puede influir en la velocidad de descarga y en la aparición de atascos del material almacenado durante la descarga.

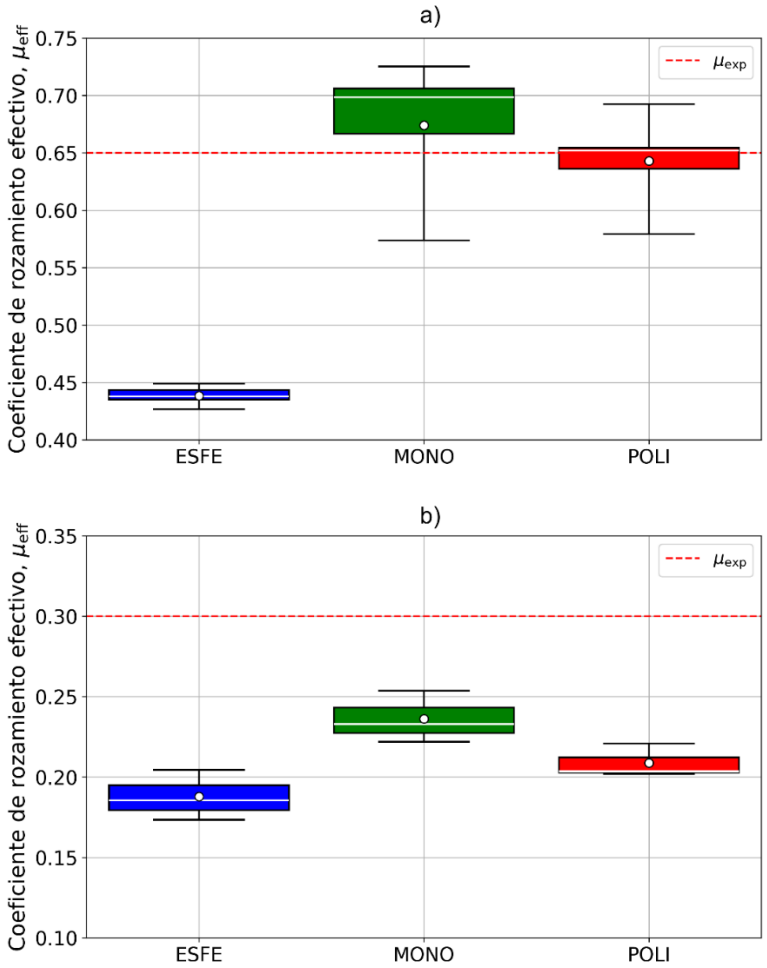


Figura 6. ***Coeficientes de rozamiento efectivo. a) en el cuerpo del silo b) en la tolva***

5. Conclusiones

En el presente trabajo se han desarrollado tres modelos de elementos discretos para analizar la influencia de la forma y distribución de tamaños de partícula en la eficiencia computacional, el caudal másico durante la descarga, la distribución de

presiones y el coeficiente de rozamiento en silos de pared ondulada. Las principales conclusiones derivadas de la investigación son las siguientes:

- El modelo esférico es el más eficiente computacionalmente, con menor tiempo de cálculo y menor consumo de memoria, mientras que el modelo polidisperso requiere un mayor tiempo de cálculo y espacio para almacenar los resultados, debido al mayor número de partículas.

- El caudal másico de descarga es más estable en el modelo esférico, mientras que los modelos cilíndricos presentan fluctuaciones debido a la orientación y compactación de las partículas.

- Las presiones normales en el silo son más homogéneas en el modelo esférico, mientras que en los modelos cilíndricos aparecen picos de presión a la largo de la pared, debido a una mayor resistencia interna y redistribución localizada de esfuerzos.

- Los modelos cilíndricos presentan mayores variaciones en las presiones tangenciales, en contraste con el modelo esférico que muestra una distribución más uniforme

- El coeficiente de rozamiento efectivo es mayor en los modelos mono y polidispersos, especialmente en el cuerpo del silo, debido a la interacción de las partículas cilíndricas con la chapa ondulada, mientras que, en la tolva, con chapa lisa, las diferencias entre modelos son menores.

- La forma y el tamaño de las partículas tienen un impacto significativo en la mecánica del flujo y en la interacción con las paredes, lo que debe considerarse en el diseño y optimización de silos.

- Desde una perspectiva global, el modelo polidisperso es el que representa de forma más realista todas las variables analizadas y fenómenos existentes en el silo, aunque con un coste computacional más elevado. Si se busca una optimización en los recursos computacionales, el modelo monodisperso consigue aproximar bastante los resultados al polidisperso con un ahorro significativo en el coste computacional con relación al modelo polidisperso, y bastante similar al esférico. Teniendo en cuenta la forma de las partículas ensayadas, se desaconseja el uso del modelo esférico dado que los resultados que aporta, especialmente con respecto al flujo y el rozamiento con la pared ondulada, se alejan significativamente de los valores experimentales obtenidos.

Contribución de los autores: Conceptualización, A.G. and J.M.F.; metodología, J.M.F and E.G.; software, A.G.; validación, A.G. and J.M.F.; análisis formal, E.G. and J.M.F; investigación, A.G..; recursos, F.A. and E.G.; tratamiento de datos, A.G.; redacción del borrador original, A.G.; redacción, revisión y edición, J.M.F, E.G. and F.A.; visualización, A.G. and J.M.F; supervisión, J.M.F.; gestión del proyecto, E.G.; obtención de financiación, E.G and F.A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación a través del proyecto de investigación PID2019-107051GBI00/AEI/10.13039/501100011033.

Declaración de la Comisión de Revisión Institucional: No aplicable

Declaración de consentimiento informado: No aplicable

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Madrid (www.upm.es) haber proporcionado recursos informáticos en el Supercomputador Magerit.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. Los financiadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio; en la recogida, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito o en la decisión de publicar los resultados.

Referencias

1. Horabik, J.; Molenda, M. Mechanical properties of granular materials and their impact on load distribution in silo: a review. Sci. Agric. Bohem. 2014, 45(4), 203-211. http://doi.org/10.1515/sab-2015-0001
2. Höhner, D.; Wirtz, S.; Scherer, V. A numerical study on the influence of particle shape on hopper discharge within the polyhedral and multi-sphere discrete element method. Powder Technol. 2012, 226, 16-28. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.041
3. Wiącek J.; Molenda M. Effect of particle size distribution on micro- and macromechanical response of granular packings under compression. Int. J. Solids Struct. 2014, 51, 4189–4195. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.06.029
4. Salehi H.; Timmerfors J.G.; Hajmohammadi H.; Garg V.; Berry R.J.; Barletta D.; Poletto M.; Jönsson L.J.; Bradley M.; Larsson S. The role of particle size and other properties on silo discharge behaviour of chipped wood biomass. Powder Technol. 2024, 432, 119174. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119174
5. Latham, J.P.; Munjiza A. The modelling of particle systems with real shapes. Phil. Trans. R. Soc. 2004, 362(1822), 1953–1972. http://doi.org/10.1098/rsta.2004.1425
6. Wu, J.; Bindo J.; Chen J.; Yang Y. Multi-scale study of particle flow in silo. Adv. Powder Technol. 2009, 20(1), 62-73. https://doi.org/10.1016/j.apt.2008.02.003
7. Watanabe D.; Moriguchi S.; Terada K. A numerical study on the effects of particle size distribution on run-out distance of granular flow. Soils Found. 2022, 62, 101242. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101242
8. Zhao Y. An investigation into the impact of particle properties on flow behaviours, PhD thesis, Nanyang Technological University, Singapore, 2020.
9. Gallego, E.; Fuentes, J.M.; Wiącek, J.; Villar, J.R.; Ayuga, F. DEM analysis of the flow and friction of spherical particles in steel silos with corrugated walls. Powder Technol. 2019, 355, 425-437. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.072
10. Wang, X.; Yu, J.; Lv, F.; Wang, Y.; Fu, H. A multi-sphere based modelling method for maize grain assemblies. Adv. Powder Technol. 2017, 28(2), 584-595. https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.10.027
11. Guo, Y.; Wassgren, C.; Curtis, J.S.; Xu, D. A bonded sphero-cylinder model for the discrete element simulation of elasto-plastic fibers. Chem. Eng. Sci. 2018, 175, 118-129. https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.029
12. Mori, Y.; Sakai, M. Advanced DEM simulation on powder mixing for ellipsoidal particles in an industrial mixer. Chem. Eng. J. 2022, 429, 132415. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132415
13. Zhang, S; Zsáki, A.M. Effect geometric detail on the outcome of DEM simulations with polyhedral particles. Geomech. Geoengin. 2023, 18(5), 426-439. https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2065037

14. Höhner, D.; Wirtz, S.; Scherer, V. Experimental and Numerical Investigation on the Discharge of Wood Pellets From a Hopper With the Discrete Element Method. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 45172, pp. 37-47). 2022. American Society of Mechanical Engineers.
15. Xu L.; Wu X.; Liang J.; Wang S.; Bao S. (2023), Multi-level DEM study on silo discharge behaviours of non-spherical particles, Particuology 2023, 82, 179-191. https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.02.001
16. Govender, N.; Wilke, D.N.; Pizette, P.; Abriak, N.E. A study of shape non-uniformity and poly-dispersity in hopper discharge of spherical and polyhedral particle systems using the Blaze-DEM GPU code. Appl. Math. Comput. 2018, 319, 318-336. https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.03.037
17. Li, Y.; Xu, Y.; Thornton, C. A comparison of discrete element simulations and experiments for 'sandpiles' composed of spherical particles. Powder Technol. 2005, 160(3), 219-228. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.09.002
18. Favier, J.F.; Abbaspour-Fard, M.H.; Kremmer, M.; Raji, A.O. Shape representation of axisymmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multi-element model particles. Eng. Comput. 1999, 16(4), 467–480. https://doi.org/10.1108/02644409910271894
19. Gallego, E.; Fuentes, J.M.; Ruiz, A.; Hernández-Rodrigo, G.; Aguado, P.; Ayuga, F. Determination of mechanical properties for wood pellets used in DEM simulations. Int. Agrophys. 2020, 34(4), 485-494. https://doi.org/10.31545/intagr/130634

Reducción de cuantías mecánicas en estructuras de hormigón armado con elementos aligerados, en particular con yeso vibro comprimido.

José Flores Yepes[1], Juan Berná Serna[1], Carlos A. Cabrera[1], Antonio Martínez Gabarrón[1], Fernando Aragón Rodriguez[1]

[1] Universidad Miguel Hernández; ja.flores@umh.es; juan.bernas@umh.es; antonio.martinez@umh.es; c.antonino.c@gmail.com

Resumen:
El estudio analiza la incorporación de este material en estructuras de hormigón armado (unidireccional y reticular) como aligerante y su impacto en el uso de acero. Se evaluó una vivienda de 505,55 m² con distintos sistemas estructurales, comparando con hormigón vibro comprimido, aligerado, cerámica, EPS y bloques de yeso.
Para la opción de reticular/direccional sin sismo, se obtiene una reducción de cuantías de acero referidos al hormigón prefabricado en porcentaje, de 3,2/1,2% para el hormigón aligerado, 2,2/1,9% en cerámica, 6,0/4,0% EPS, 3,7% para el yeso vibro comprimido, y de un 4,2/4,7% si es aligerado con arlita. En sismo, la reducción es del 4,0/3,0% con hormigón aligerado, 2,7/1,8% en cerámica, 10,6/7,6% EPS, 5,5/4,4% para el yeso vibro comprimido, y de un 7,1/5,2% para el aligerado con arlita.

El resultado representa una solución innovadora y sostenible para la construcción, promoviendo la eficiencia estructural.

Palabras clave: ladrillos, aditivos para yesos, sulfato cálcico, eficiencia energética.

1. Introducción

La Universidad Miguel Hernández, a través de su departamento de Ingeniería, el Grupo de Investigación de Nuevos Materiales y el CIAGRO, ha desarrollado un elemento prefabricado de yeso mediante vibro compresión (Patente P202300065). Este avance mejora significativamente el aislamiento acústico y térmico, la resistencia al fuego y la sostenibilidad en la construcción, reduciendo peso, costes y emisiones de CO_2, de acuerdo con los criterios establecidos en la evaluación de sostenibilidad de edificaciones [6].

El peso propio en al cálculo de estructuras de hormigón (caso que nos ocupa), es la carga debida al peso del elemento resistente. Su determinación, en el proceso de cálculo, se estima inicialmente, pudiendo para ello utilizarse tablas y/o fórmulas empíricas, o datos de estructuras construidas de características semejantes. Con las dimensiones calculadas se debe de verificar el peso propio real del elemento y se rectificaran, si es preciso los cálculos basados en la estimación.

De forma general, se puede establecer que el peso propio representa aproximadamente el 50% de la carga total del edificio.

Para determinar el peso propio de los forjados realizados con elementos prefabricados o semi prefabricados, para el caso de forjados unidireccionales, se debe de consultar las fichas técnicas de la autorización de uso de cada fabricante. En ellas se establece entre muchos otros datos de interés, los materiales que forman el forjado y el peso propio del mismo en función de los interejes. Si nos referimos al caso de forjados reticulares, además de las tablas se usan los datos facilitados por los mismos fabricantes sobre los pesos unitarios de dichos elementos.

Estos resultados refuerzan estudios previos sobre la eficiencia de materiales aligerados en la construcción sostenible, como los realizados en la Universidad de Nariño y en la Politécnica Salesiana de Ecuador, que demostraron reducciones de hasta un 20% en materiales de construcción tradicionales con técnicas similares.

El uso de elementos aligerados en la construcción ha cobrado relevancia debido a su impacto en la reducción de peso, eficiencia estructural y sostenibilidad. Entre estos materiales, el yeso vibro comprimido presenta ventajas en términos de resistencia mecánica y facilidad de instalación, atributos que se alinean con las políticas europeas sobre prefabricación sostenible [8].

El objetivo de este trabajo es el de analizar las cuantías mecánicas de acero en estructuras de hormigón, empleando, como referencia de comparación un nuevo elemento constructivo de yeso fabricado por vibro compresión y, comparándolo con los sistemas tradicionales de elementos aligerantes. El valor significativo de la comparativa es el peso, siendo un valor importante pues en su reducción, redunda un menor consumo de energía, por tanto, una reducción en las emisiones de CO_2, así como de los costes operativos, en línea con estudios sobre eficiencia energética en materiales prefabricados [7].

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Emplearemos para la compratativa del estudio un edificio, tipo chalet tipo con acero B500SD, hormigón HA30, y estructura de dos plantas más casetón de cubierta. Se ha valorado la opción de calculo con y sin sismo [7]. Los datos considerados para el sismo: Alicante, Orihuela. Aceleración bádica 0.16, coeficiente de contribución 1. Tipo de terreno III, Modos de vibración hasta conseguor el 90% del masa desplazada.

Los forjados que constituyen la estrcutura también han sido de dos tipos: calculo con forjado reticular y cálculo con forjado unidireccional. Ambos de canto 30+5cm, nervios de 10cm, interejes de 70 cm, y para el reticular, tres piezas aligerantes para una cuadrícula de 70x70cm.

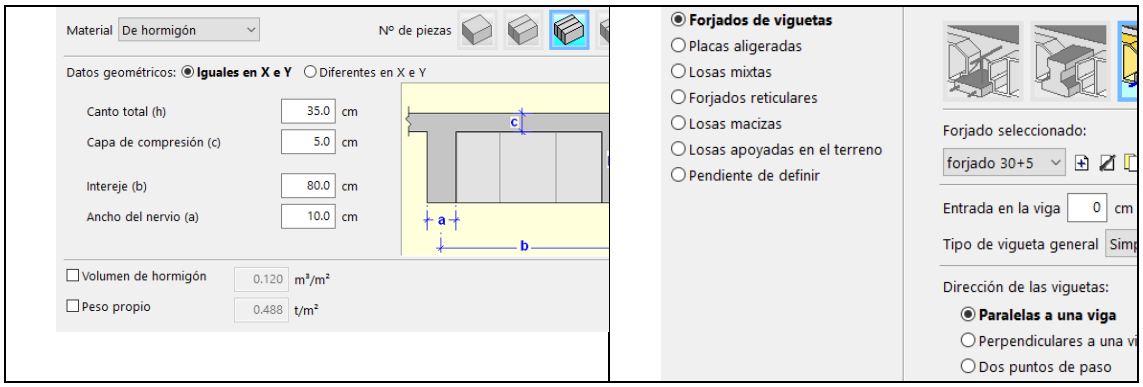


Figura 1. Tipos de forjados empleados: reticular y unidireccional.

Los materiales que forman parte del estudio de elementos aligerantes, son: hormigón vibro comprimido, hormigón ligero con arlita o pómez, cerámica (arcilla cocida), poliestireno expandido (EPS), yeso vibro comprimido y yeso vibro comprimido con arlita. En la designación que se expone en el capítulo de resultados, se ha reducido el texto: Hormigón , Hormigón ligero, Cerámica, EPS, Yeso, Yeso ligero

Se ha empleando para el modelado de la estructura y el cálculo de la misma, el programa CYPECAD de la empresa Cype Ingenieros S.L.

Como se indica en la Tabla 1, el edificio se estructura en tres plantas, incluido el casetón de cubierta hasta alcanzar un altura maxima de 10 m, con una superficie de 505,55 m^2.

Tabla 1. Defición de las alturas del edificio.

Grupo	Nombre del grupo	Planta	Nombre planta	Altura	Cota
3	CASETON	3	Casetón	3.00	10.00
2	Forjado 2	2	Forjado 2	3.50	7.00
1	Forjado 1	1	Forjado 1	3.50	3.50
0	Cimentación				0.00

En cuanto al modelado del edificio por plantas, para los forjados reticulares y unidireccionales, se muestran en las figuras siguientes: 2 y 3.

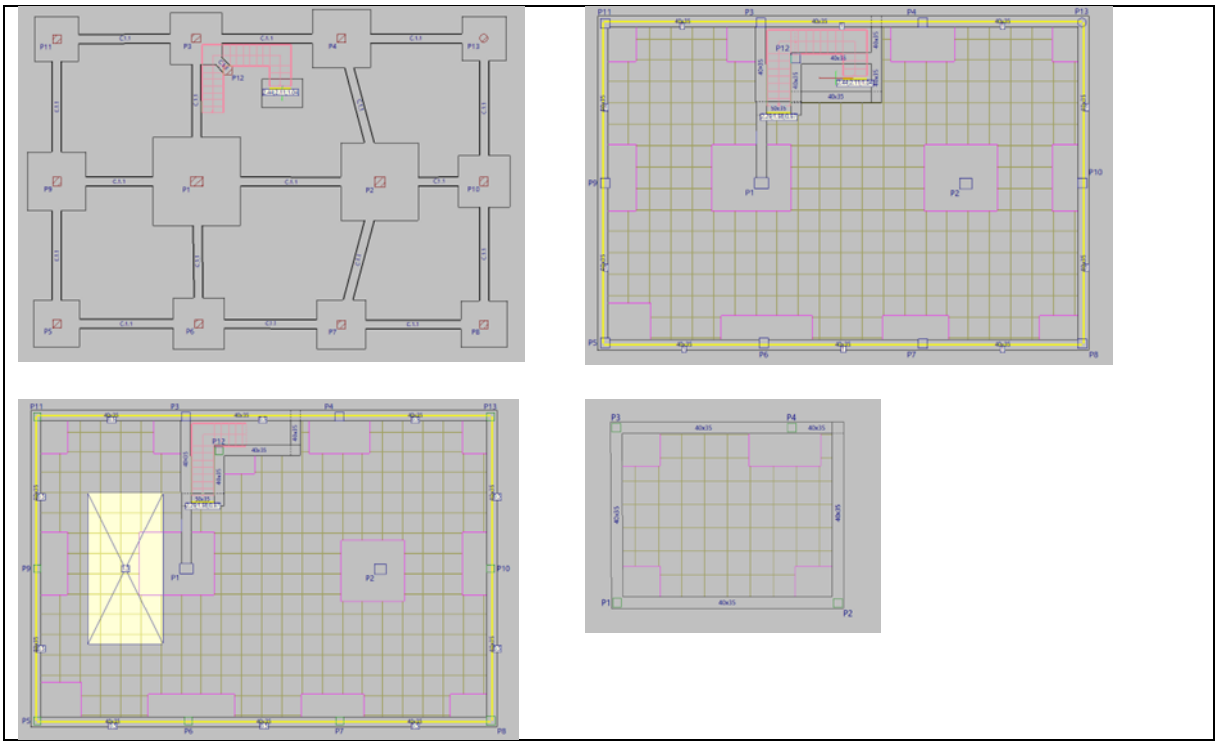


Figura 2. Estructura modelada de forjados reticulares.

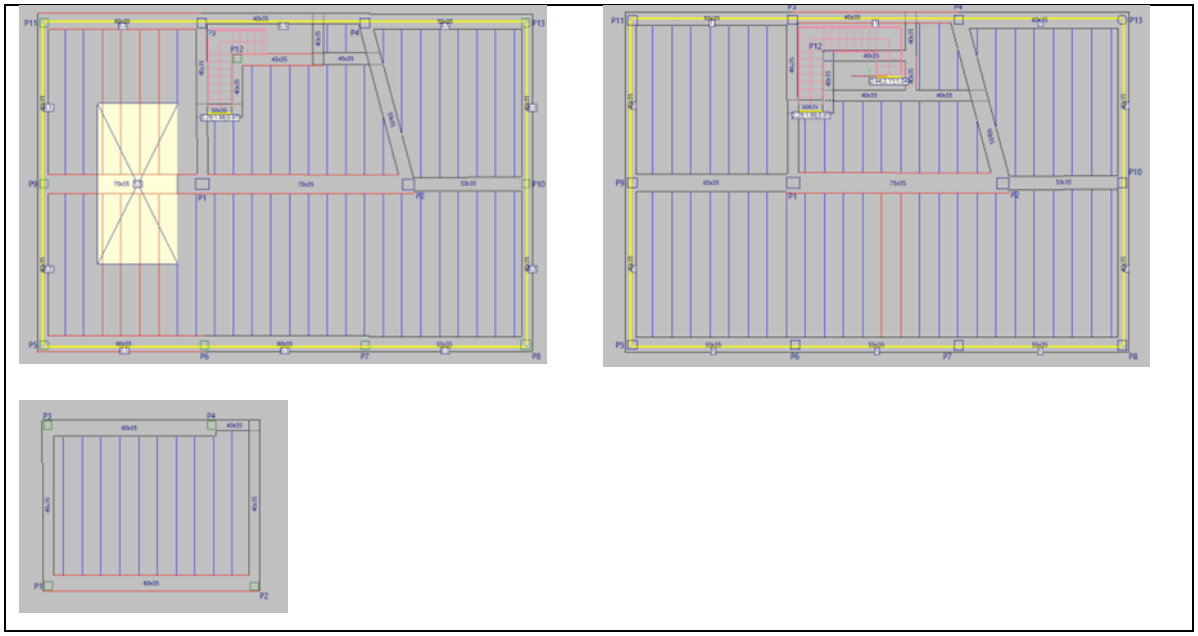


Figura 3. Estructura modealada de forjados unidireccionales

Los pesos que hemos referenciado para el cálculo, son los siguientes:

Tabla 2. Relación de pesos considerados**. (Fuente: pesos de referencia de la base de datos *de CYPE Ingenieros y propia)***

CANTO 30+5	Peso específico (t/m^3)	Peso elemento aligerante (t/m^2)	t	Volumen de hormigón m3/m^2	Peso propio t/m^2
Hormigón	2,4	0,2	0,098	0,12	0,488
Hormigón ligero	1,7	0,127	0,062	0,12	0,415
Cerámica	1,9	0,15	0,074	0,12	0,438
EPS	0,0275	0,012	0,006	0,12	0,300
Yeso	1,3	0,108	0,053	0,12	0,396
Yeso ligero	1,1	0,092	0,045	0,12	0,380

https://vgatec.blogspot.com/2012/04/el-aligeramiento-en-la-edificacion.html

2.2. Procedimientos o métodos

Una vez modelada la estructura y calculada con programa CYPECAD, se han obtenido las cuantías de obra de acero para cada supuesto: sin sismo y con sismo, y cada elemento aligerante. Se ha tenido en consideración la estructura completa, y se han descartado las cuantías que no se refieren a los forjados: escaleras, losas y zapatas.

3. Resultados y discusión

3.1. Forjado Reticular sin sismo

Para este supuesto, el resultado se indica en la Tabla 3 adjunta.

Tabla 3. Cuantías de acero para el caso de forjado reticular sin sismo.

CANTO 30+5	HORMIGON	HORMIGON ALIGERADO	CERAMICA	EPS	YESO	YESO VIBRO
Elemento	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)
Forjados reticulares	5700	5494	5.575	5281	5458	5417
Armadura base de ábacos	441	441	441	441	441	441
Vigas	1767	1746	1.752	1719	1742	1735
Pilares	908	850	850	850	850	850
Total	8816	8531	8618	8291	8491	8443
SUPERFICIE m2	505,55					
Índices (por m²)	17,44	16,87	17,05	16,40	16,80	16,70

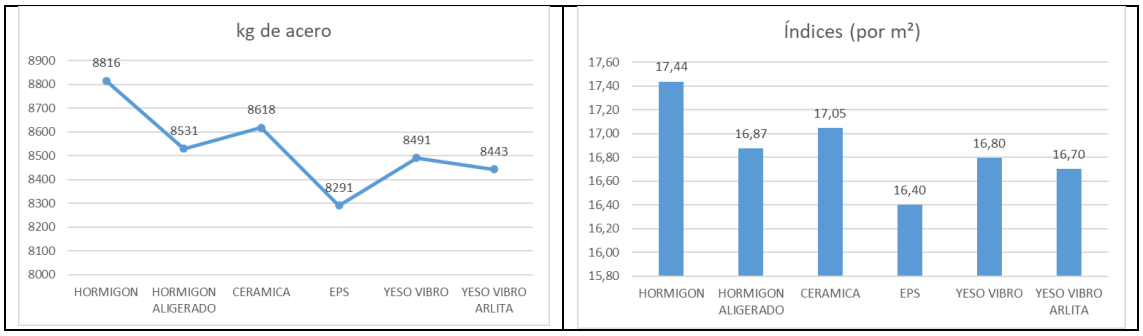


Figura 4. Resultados del cálculo para reticular sin sismo.

Se observa que con la excepción del EPS cuyo peso es incuestionable, el hormigón vibro comprimido aligerado tiene un comportamiento parecido al yeso vibro comprimido. La reducción de cuantías, con relación al hormigón, es del 3,2% para el hormigón aligerado, 2,2% para cerámica [9], 6,0% el EPS, 3,7% el yeso vibro y 4,2%, el yeso vibro comprimido con arlita.

3.2. Forjado Reticular con sismo

Para este supuesto, el resultado se indica en la Tabla 4 adjunta.

Tabla 4. Cuantías de acero para el caso de forjado reticular con sismo.

CANTO 30+5	HORMIGON	HORMIGON ALIGERADO	CERAMICA	EPS	YESO	YESO VIBRO
Elemento	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)	Barras (kg)
Forjados reticulares	8573	8199	8344	7549	8091	7928
Armadura base de ábacos	441	441	441	441	441	441
Vigas	3649	3577	3601	3475	3567	3557
Pilares	4291	4051	4102	3697	3920	3832
Total	16954	16268	16488	15162	16019	15758
SUPERFICIE m²	505,55					
Índices (por m²)	33,54	32,18	32,61	29,99	31,69	31,17

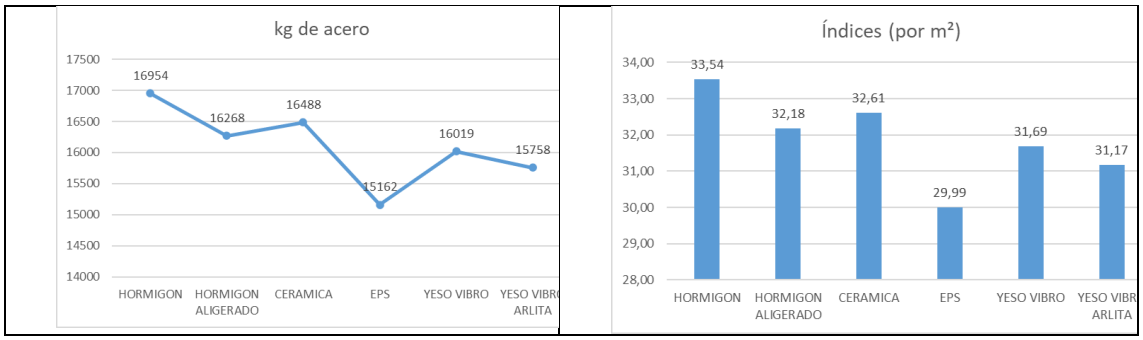


Figura 6. Resultados del cálculo para reticular con sismo

Para este caso, las cuantías han aumentado considerablemente; así, con relación al hormigón, la reducción es del 4,0% para el hormigón aligerado, del 2,7% si se emplea cerámica, 10,6% EPS, 5,5% para el yeso vibro, 7,1% para yeso vibro comprimido con arlita.

3.3. Forjado Unidireccional sin sismo

Para este supuesto, el resultado se indica en la Tabla 5 adjunta.

Tabla 5. Cuantías de acero para el caso de forjado reticular con sismo.

CANTO 30+5	HORMIGON	HORMIGON ALIGERADO	CERAMICA	EPS	YESO	YESO VIBRO
Elemento	Barras	Barras	Barras	Barras	Barras	Barras
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
Forjados reticulares	2144	2071	2092	1966	2035	2017
Armadura base de ábacos	30	30	30	30	30	30
Vigas	4314	4296	4218	3927	4117	4083
Pilares	1115	1115	1115	1106	1115	1113
Total	7603	7512	7455	7029	7297	7243
SUPERFICIE m2	505,55					
Índices (por m²)	15,04	14,86	14,75	13,90	14,43	14,33

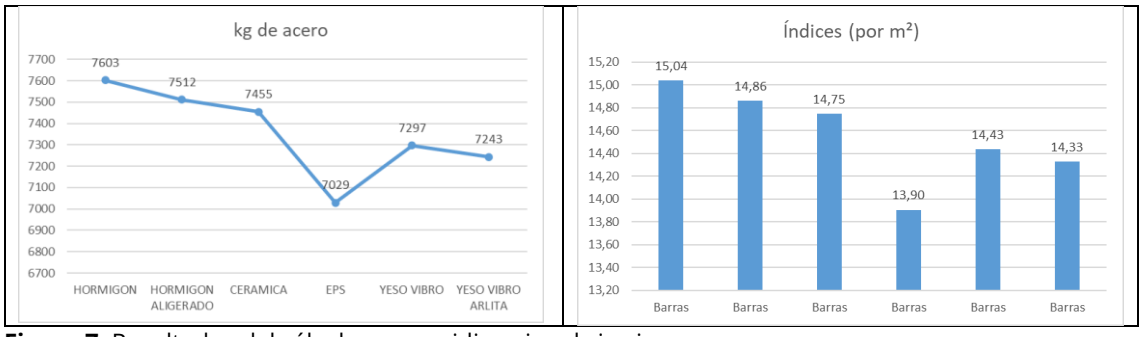


Figura 7. Resultados del cálculo para unidireccional sin sismo

Para el caso de forjados unidireccionales, las cuantías tienen menor relevancia que el reticular. Aun así, es importante observar que, con relación al hormigón, la reducción es del 1,2% para el hormigón aligerado, del 1,9% si se emplea cerámica, 7,5% EPS, 4,0% para el yeso vibro, 4,7% para yeso vibro comprimido con arlita.

3.3. Forjado Unidireccional con sismo

Para este supuesto, el resultado se indica en la Tabla 6 adjunta.

Tabla 6. Cuantías de acero para el caso de forjado reticular con sismo.

CANTO 30+5	HORMIGON	HORMIGON ALIGERADO	CERAMICA	EPS	YESO	YESO VIBRO
Elemento	Barras	Barras	Barras	Barras	Barras	Barras
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
Forjados reticulares	2538	2466	2487	2334	2423	2397
Armadura base de ábacos	30	30	30	30	30	30
Vigas	7509	7235	7263	6956	7172	7116
Pilares	4662	4571	4687	4305	4460	4431
Total	14739	14302	14467	13625	14085	13974
SUPERFICIE m2	505,55					
Índices (por m²)	29,15	28,29	28,62	26,95	27,86	27,64

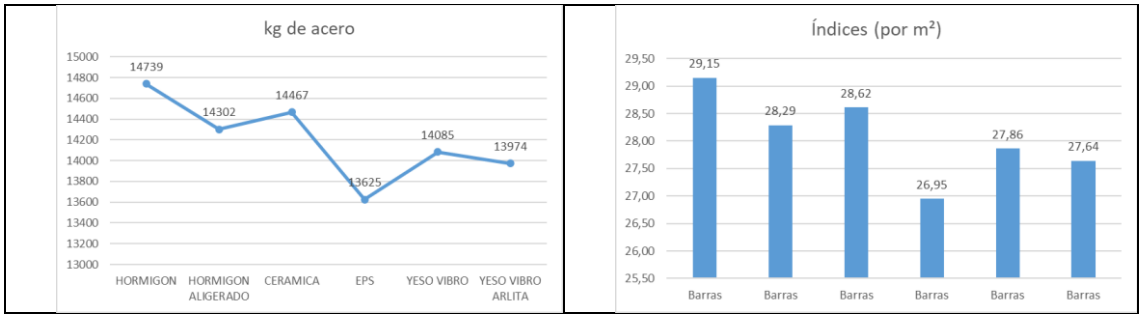


Figura 7. Resultados del cálculo para unidireccional sin sismo

Para este último caso de forjados unidireccionales con sismo se observar que, con relación al hormigón, la reducción es del 3,0% para el hormigón aligerado, del 1,8% si se emplea cerámica, 7,6% EPS, 4,4% para el yeso vibro, 5,2% para yeso vibro comprimido con arlita.

4. Conclusiones

Para el caso de no considerar el sismo, las cuantías geométricas de kg de acero por metro cuadrado de estructura, se reducen en cualquiera de las opciones si las comparamos con los elementos empleados actualmente y, en general, en la mayoría de las obras que es el hormigón vibro comprimido. El en caso del yeso vibro comprimido, elemento constructivo en cuyo análisis nos centramos se reducen en un 3,7% para el caso de reticular sin sismo, y de 4% en el caso de unidireccional. Estos valores se incrementan si se emplea yeso aligerado con arlita pasando al 4,2% y 4,7% respectivamente.

El EPS (Poliestireno expandido) sería el material que marca una diferencia significativa en la reducción de cuantías, siendo del 6% para el primer caso de reticular, y del 7,5% para el unidireccional.

Para la opción de considerar el sismo, las cuantías aumentan, siendo de 5,5% en el caso de elementos vibro comprimido de yeso y forjado reticular, y del 4,4% en el caso de unidireccional. En la opción de yeso aligerado, la cuantía pasa a reducirse un 7,1% y un 5,2% para el segundo caso. De nuevo el EPS se impone con un 10,6% en reticular y un 7,6% en unidireccional.

La cerámica, en cambio, muestra menor reducción de cuantías de acero (2,2% - 2,7%).

Sin duda, queda claro que el empleo de este elemento aligerante contribuye significativamente a la reducción de kg de acero en las estructuras, al margen de otras consideraciones, no consideradas en el documento, que remarcan las bondades de su uso.

Finalmente, indicar que investigaciones adicionales han demostrado que el empleo de materiales aligerados no solo reduce la cantidad de acero en estructuras, sino que también mejora la eficiencia energética de los edificios. Estudios recientes destacan que la incorporación de yeso vibro comprimido puede reducir hasta un 15% el consumo de energía durante el ciclo de vida del edificio, comparado con soluciones tradicionales. Además, el uso de elementos prefabricados optimiza la rapidez de construcción y minimiza el desperdicio de material, como lo confirman estudios europeos sobre prefabricación en la construcción sostenible.

Author Contributions:

José Antonio Flores Yepes. Conceptualización e investigación.

Antonio Martínez Gabarrón. Análisis formal y validación

Juan Manuel Berna Serna. Análisis formal y de metodología

Carlos Antonino Cabrera. Doctorando. Análisis de recursos, estudio de materiales.

Fernando Aragón. Revisión y edición.

Referencias

1. Norma EN UNE 13279-1. 2006: Yesos para la construcción. Parte 1: definiciones y especificaciones.
2. Ruiz De La Cruz, D. (2016). Auditoría energética de una industria cerámica de fabricación de tejas y ladrillos. http://hdl.handle.net/10251/72725

3. Instituto para la Divulgación y Ahorro de Energía. IDEA. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Factores de conversión energía final-energía primaria y factores de emisión de CO2. Año 2010.
4. Buitrago Caicedo, M. Universidad de Nariño, Año 2015. Plan de negocio para la creación de una ladrillera tipo refractarios en el municipio de San Andrés de Tumaco.
5. Guillen Coello, H. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador. 2011. Análisis de Factibilidad para la Implementación de una Fábrica de Ladrillos para la Construcción.
6. UNE-EN 16309:2014. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Método de análisis de impactos ambientales.
7. González, J., & Martínez, R. (2019). "Estrategias de eficiencia energética en edificios mediante uso de materiales prefabricados." Revista de Construcción, 18(2), 45-60.
8. Consejo Europeo de Construcción Sostenible. (2020). "El impacto de la prefabricación en la reducción de residuos y mejora de eficiencia constructiva en la UE."
9. Asociación Española del Cemento y el Hormigón. (2021). "Análisis comparativo de materiales aligerados en estructuras de hormigón." Informe Técnico 2021-04.

Comparativa de costes de los bloques de yeso por sistema de vibro compresión con relación a los materiales empleados en tabiquería.

José Flores Yepes[1], Juan Berná Serna[1], Ana Codes-Alcaraz[1], Carlos Cabrera[1], Antonio Martínez Gabarrón[1].

1 Universidad Miguel Hernández, Elche, Alicante, España. Carretera de Beniel, Km. 3,2;

anacodes97@gmail.com; ja.flores@umh.es; juan.bernas@umh.es; antonio.martinez@umh.es; c.antonino.c@gmail.com

Resumen: El Grupo de Investigación de nuevos materiales del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández, adscrito al Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentario y Agroambiental, presenta un desarrollo basado en el sulfato cálcico como materia prima principal, que contribuye una considerable reducción de emisiones de CO2 por la menor cantidad de energía que implica su proceso de fabricación.
Este trabajo (Patente P202300065) emplea el sistema tradicional de vibro compresión, pero solo utilizando sulfato cálcico -yeso- como materia prima; de este modo, se consigue un nuevo "material", que se incorpora al sector de la construcción.
El trabajo se refiere al estudio de costes en paredes de compartimentación, con enlucido a una o dos caras. Se ha analizado: el tabique gran formato cerámico, tabique cerámico, el cartón yeso con y sin aislamiento, y el bloque de yeso vibro comprimido.

Se obtiene un ahorro del 54% respecto del tabique de cartón yeso con aislamiento, un 39% sin dicho aislamiento, un 45% con respecto del cerámico, y un 42% con el cerámico de gran formato. En el enlucido, un 55% con el cerámico, 54% con el cerámico de gran formato, un 47% para el cartón yeso con aislamiento y un 31% sin aislamiento.

Palabras clave: Vibro compresión, costes de compartimentación, tabiquería, cerámica, cartón yeso, yeso vibro comprimido

1. Introducción

Para entender el desarrollo propuesto y la comparativa de costes, en primer lugar, haremos una breve descripción de los procesos que conforman los elementos intervinientes en la comparativa.

El proceso de fabricación por vibro compresión, es un método más que probado por la larga trayectoria mostrada en la fabricación de prefabricados de hormigón [7]. Es un sistema que, a diferencia, de la extrusión de la cerámica que necesita máquinas de enorme presión -alto coste energético en consumo eléctrico- para la inyección de la arcilla por el cabezal del molde que forma la pieza de salida, este sólo emplea un sistema de vibración más el de presión hidráulica. Otro aspecto de

la cerámica es el alto consumo energético del proceso posterior: secado de las piezas en hornos a que alcanzan los 100ºC y cocción de las mismas en hornos posteriores que superan los 850ºC.

El hormigón vibro comprimido, que no se recoge en la comparativa, además de empelar áridos pesados añade el cemento como aglomerante cuya cocción supera los 1400ºC.

La referencia a la fabricación del cartón yeso, o yeso laminado, cuya profusión en obras ha tenido un crecimiento considerable, se demuestra que es un proceso poco eficiente, por los costes que se refieren fundamentalmente a la estabilización del yeso, uso de celulosa, y secado final de las placas en hornos de secado; además de las estructuras auxiliares que deben emplearse para su ejecución.

La diferencia sustancial con el yeso vibro comprimido, es que la materia prima se consigue cociendo el yeso a temperaturas que no superan los 250ºC, y que una vez conformada la pieza, esta no necesita más que un secado rápido que puede ser al aire libre y que depende de las condiciones atmosféricas [1] de temperatura y humedad.

Si bien, las comparaciones energéticas sobre estos sistemas quedan fuera del objeto de estudio que se centra en los precios de mercado de los sistemas de cerámica, yeso laminado, hormigón vibro comprimido, y el nuevo sistema de piezas de yeso machihembradas por vibro compresión, si parece conveniente establecer la referencia de consumos energéticos.

Para nuestro estudio, partimos de los precios de mercado de los elementos tal y como se define en las bases de datos de precios de las administraciones públicas (Región de Murcia), y la base de precios de la empresa Cype Ingenieros, desglosando las distintas unidades de obra que intervienen. Así, se tiene en consideración por un lado el precio del elemento en obra, la mano de obra de montaje. Los elementos de agarre, la necesidad de enfoscados/maestreado y enlucidos finales.

2. Materiales y métodos.

Como hemos indicado, para establecer unos precios de referencia en la comparativa emplearemos las bases de datos de elementos constructivos de CYPE y los de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia [8]. Se va a mantener el mismo espesor de pared de 7cm para la comparativa.

2.1. Sistemas constructivos.

Figura 1. Ladrillo cerámico pequeño/gran formato.

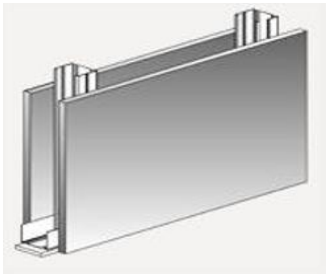


Figura 2. Cartón yeso.

Figura 3. Aislamiento cartón yeso

Figura 4. Yeso vibro comprimido

2.2. Precios descompuestos.

2.2.1. Gran formato. Ladrillo cerámico a revertir de gran formato. Hoja de partición interior, de 7 cm de espesor, de fábrica de ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 50x20x7 cm, con juntas de 10 mm de espesor, recibida con una mezcla en agua de pegamento de cola preparado y hasta un 25% de yeso de calidad B1.

Tabla 1. Gran formato cerámico. https://carm.generadordeprecios.info/

			gran formato 50x20x7					
FFQ010	**m²**		**Hoja de partición interior, de fábrica de ladrillo cerámico para revestir.**					
Hoja de partición interior, de 7 cm de espesor, de fábrica de ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 50x20x7 cm, con juntas de 10 mm de espesor, recibida con una mezcla en agua de pegamento de cola preparado y hasta un 25% de yeso de calidad B1.								
Código		Unidad	Descripción		Rendimiento	**Precio unitario**	Importe	
1			Materiales					
mt04lvg010b		Ud	Ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 50x20x7 cm, para uso en fábrica protegida (pieza P), densidad 780 kg/m³, según UNE-EN 771-1.		10	0,81	8,1	
mt09eyc010		kg	Pegamento de escayola.		9,035	0,28	2,53	
				Subtotal materiales:			**10,63**	
2			Mano de obra					
mo021		h	Oficial 1ª construcción en trabajos de albañilería.		0,249	22,53	5,61	
mo114		h	Peón ordinario construcción en trabajos de albañilería.		0,124	21,19	2,63	
				Subtotal mano de obra:			**8,24**	
3			Costes directos complementarios					
		%	Costes directos complementarios		2	18,87	0,38	
Coste de mantenimiento decenal: 0,39€ en los primeros 10 años.						**Costes directos** (1+2+3):	19,25	

Se observa el precio 19,25€/m^2 con terminación a buena vista sin maestreado y acabado rugoso en las juntas [8].

2.2.2. Formato 33x16x7. Hoja de partición interior, de 7 cm de espesor, de fábrica de ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 33x16x7 cm, con juntas horizontales y verticales de 10 mm de espesor, recibida con mortero de cemento industrial, color gris, M-5, suministrado a granel.

Tabla 2. Formato tradicional cerámico. https://carm.generadordeprecios.info/

			formato 33x16x7					
FFQ010	**m²**		**Hoja de partición interior, de fábrica de ladrillo cerámico para revestir.**					
Hoja de partición interior, de 7 cm de espesor, de fábrica de ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 33x16x7 cm, con juntas horizontales y verticales de 10 mm de espesor, recibida con mortero de cemento industrial, color gris, M-5, suministrado a granel.								
Código		Unidad	Descripción		Rendimiento	**Precio unitario**	Importe	
1			Materiales					
mt04lvc010g		Ud	Ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 33x16x7 cm, para uso en		18	0,44	7,92	

mt08aaa010a	m³	Agua.	0,004	1,5	0,01
mt09mif010cb	t	Mortero	0,012	50,2	0,6
			Subtotal materiales:		**8,53**
2		Equipo y maquinaria			
mq06mms010	h	Mezclador continuo con	0,045	1,94	0,09
			Subtotal equipo y maquinaria:		**0,09**
3		Mano de obra			
mo021	h	Oficial 1ª construcción	0,348	22,53	7,84
mo114	h	Peón ordinario	0,187	21,19	3,96
			Subtotal mano de obra:		**11,8**
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes	2	20,42	0,41
Coste de mantenimiento decenal: 0,42€ en los primeros 10 años.			**Costes directos** (1+2+3+4):		20,83

Precio 20,83€/m^2 con terminación a buena vista sin maestreado y acabado rugoso en las juntas. La mano de obra de colocación aumenta por el número de piezas.

2.2.3. Tabique de yeso laminado 70mm. Sin aislamiento. Tabique sencillo (15+70+15)/400 (70) (2 normal), con placas de yeso laminado, de 100 mm de espesor total, con nivel de calidad del acabado estándar (Q2), formado por una estructura simple de perfiles de chapa de acero galvanizado de 70 mm de anchura, a base de montantes (elementos verticales) separados 400 mm entre sí, con disposición normal "N" y canales (elementos horizontales), a la que se atornillan dos placas en total (una placa tipo normal en cada cara, de 15 mm de espesor cada placa). Incluso banda acústica de dilatación autoadhesiva; fijaciones para el anclaje de canales y montantes metálicos; tornillería para la fijación de las placas; cinta de papel con refuerzo metálico y pasta y cinta para el tratamiento de juntas.

Tabla 3. Tabique placa yeso. https://carm.generadordeprecios.info/

FBY010	**m²**	**Tabique de placas de yeso laminado. 70mm. Sin aislamiento.**			
Tabique sencillo (15+70+15)/400 (70) (2 normal), con placas de yeso laminado, de 100 mm de espesor total, con nivel de calidad del acabado estándar (Q2), formado por una estructura simple de perfiles de chapa de acero galvanizado de 70 mm de anchura, a base de montantes (elementos verticales) separados 400 mm entre sí, con disposición normal "N" y canales (elementos horizontales), a la que se atornillan dos placas en total (una placa tipo normal en cada cara, de 15 mm de espesor cada placa). Incluso banda acústica de dilatación autoadhesiva; fijaciones para el anclaje de canales y montantes metálicos; tornillería para la fijación de las placas; cinta de papel con refuerzo metálico y pasta y cinta para el tratamiento de juntas. El precio incluye la resolución de encuentros y puntos singulares, pero no incluye el aislamiento a colocar entre los montantes.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	**Precio unitario**	Importe
1		Materiales			
mt12psg041c	m	Banda autoadhesiva desolidarizante de espuma de poliuretano de celdas cerradas, de 3,2 mm de espesor y 70 mm de anchura, resistencia térmica 0,10 m²K/W, conductividad térmica 0,032 W/(mK).	1,2	0,33	0,4

mt12psg070d	m	Canal de perfil de acero galvanizado de 70 mm de anchura, según UNE-EN 14195.	0,7	1,63	1,14
mt12psg060d	m	Montante de perfil de acero galvanizado de 70 mm de anchura, según UNE-EN 14195.	2,75	2,01	5,53
mt12psg010b	m²	Placa de yeso laminado A / UNE-EN 520 - 1200 / longitud / 15 / con los bordes longitudinales afinados.	2,1	4,77	10,02
mt12psg081c	Ud	Tornillo autoperforante 3,5x25 mm.	38	0,01	0,38
mt12psg220	Ud	Fijación compuesta por taco y tornillo 5x27.	1,6	0,06	0,1
mt12psg035a	kg	Pasta de agarre, según UNE-EN 14496.	0,1	0,43	0,04
mt12psg030a	kg	Pasta de juntas, según UNE-EN 13963.	0,6	0,9	0,54
mt12psg040a	m	Cinta microperforada de papel, según UNE-EN 13963.	3,2	0,04	0,13
mt12psg040b	m	Cinta de papel con refuerzo metálico, según UNE-EN 14353.	0,3	0,42	0,13
			Subtotal materiales:		**18,41**
2		Mano de obra			
mo053	h	Oficial 1ª montador de prefabricados interiores.	0,294	23,16	6,81
mo100	h	Ayudante montador de prefabricados interiores.	0,294	21,78	6,4
			Subtotal mano de obra:		**13,21**
3		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2	31,62	0,63
Coste de mantenimiento decenal: 1,61€ en los primeros 10 años.			**Costes directos** (1+2+3):		32,25

Precio 32,25€/m^2

2.2.4. Tabique de yeso laminado. Con aislamiento. Tabique sencillo (15+70+15)/400 (70) LM - (2 normal), con placas de yeso laminado, de 100 mm de espesor total, con nivel de calidad del acabado estándar (Q2), formado por una estructura simple de perfiles de chapa de acero galvanizado de 70 mm de anchura, a base de montantes (elementos verticales) separados 400 mm entre sí, con disposición normal "N" y canales (elementos horizontales), a la que se atornillan dos placas en total (una placa tipo normal en cada cara, de 15 mm de espesor cada placa); aislamiento acústico mediante panel semirrígido de lana mineral, espesor 65 mm, según UNE-EN 13162, en el alma. Incluso banda acústica de dilatación autoadhesiva; fijaciones para el anclaje de canales y montantes metálicos; tornillería para la fijación de las placas; cinta de papel con refuerzo metálico y pasta y cinta para el tratamiento de juntas.

Tabla 4. Tabique placa yeso con aislante. https://carm.generadordeprecios.info/

FBY015	m²	Tabique de placas de yeso laminado. Sistema "KNAUF". Con aislamiento

Tabique sencillo W111.es "KNAUF" (15+70+15)/400 (70) LM - (2 Standard (A)), de 100 mm de espesor total, con nivel de calidad del acabado Q2, formado por una estructura simple de perfiles de chapa de acero galvanizado de 70 mm de anchura, a base de montantes (elementos verticales) separados 400 mm entre sí, con disposición normal "N" y canales (elementos horizontales), a la que se atornillan dos placas en total (una placa tipo Standard (A) en cada cara, de 15 mm de espesor cada placa); aislamiento acústico mediante panel semirrígido de lana mineral, espesor 65 mm, según UNE-EN 13162, en el alma. Incluso banda acústica de dilatación autoadhesiva "KNAUF"; tornillería para la fijación de las placas; cinta de papel con refuerzo metálico "KNAUF" y pasta de juntas Jointfiller 24H "KNAUF", cinta microperforada de papel "KNAUF". El precio incluye la resolución de encuentros y puntos singulares.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
mt12pck020c	m	Banda acústica de dilatación, autoadhesiva, de espuma de poliuretano de celdas cerradas "KNAUF", de 3,2 mm de espesor y 70 mm de anchura, resistencia térmica 0,10 m²K/W, conductividad térmica 0,032 W/(mK).	1,2	0,34	0,41
mt12pfk020c	m	Canal 70/30 "KNAUF" de acero galvanizado, según UNE-EN 14195.	0,7	1,68	1,18
mt12pfk010c	m	Montante 70/38 "KNAUF" de acero galvanizado, según UNE-EN 14195.	2,75	2,07	5,69
mt16lra060c	m²	Panel semirrígido de lana mineral, espesor 65 mm, según UNE-EN 13162, Euroclase A1 de reacción al fuego según UNE-EN 13501-1 y factor de resistencia a la difusión del vapor de agua 1.	1,05	7,64	8,02
mt12ppk010ab	m²	Placa de yeso laminado A / UNE-EN 520 - 1200 / longitud / 15 / con los bordes longitudinales afinados, Standard "KNAUF"; Euroclase A2-s1, d0 de reacción al fuego, según UNE-EN 13501-1.	2,1	4,92	10,33
mt12ptk010cc	Ud	Tornillo autoperforante TN "KNAUF" 3,5x25.	38	0,01	0,38
mt12psg220	Ud	Fijación compuesta por taco y tornillo 5x27.	1,6	0,06	0,1
mt12pik010e	kg	Pasta de juntas Jointfiller 24H "KNAUF", Euroclase A2-s1, d0 de reacción al fuego, según UNE-EN 13501-1, rango de temperatura de trabajo de 5 a 30°C, para aplicación manual con cinta de juntas, según UNE-EN 13963.	1,212	0,93	1,13
mt12pck010a	m	Cinta microperforada de papel "KNAUF" de 50 mm de anchura, según UNE-EN 13963.	3,2	0,04	0,13
mt12pck010d	m	Cinta de papel con refuerzo metálico "KNAUF" de 52 mm de anchura, según UNE-EN 14353.	0,3	0,42	0,13
			Subtotal materiales:		**27,5**
2		Mano de obra			
mo053	h	Oficial 1ª montador de prefabricados interiores.	0,335	23,16	7,76
mo100	h	Ayudante montador de prefabricados interiores.	0,335	21,78	7,3
			Subtotal mano de obra:		**15,06**
3		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2	42,56	0,85
Coste de mantenimiento decenal: 2,17€ en los primeros 10 años.				**Costes directos** (1+2+3):	43,41

Precio 42,32€/m²

2.2.5. Bloque de yeso vibrocomprimido de gran formato. Bloque de yeso machihembrado de gran formato a enlucir. Hoja de partición interior, de 7 cm de espesor, 50x20x7 cm, con juntas de 5 mm de espesor, recibidas con yeso, o una mezcla en agua de pegamento de cola preparado y hasta un 25% de yeso de calidad B1.

Tabla 5. Tabique yeso vibrocomprimido. https://carm.generadordeprecios.info/

			Reduccion de mano de orba del 30% comparado con el gran formato				
			gran formato 50x20x7				
FFQ010	**m²**		**Hoja de partición interior, de fábrica de ladrillo cerámico para revestir.**				
Hoja de partición interior, de 7 cm de espesor, de fábrica de ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 50x20x7 cm, con juntas de 10 mm de espesor, recibida con una mezcla en agua de pegamento de cola preparado y hasta un 25% de yeso de calidad B1.							
Código	Unidad		Descripción	Rendimiento	**Precio unitario**	Importe	
1			Materiales				
mt04lvg010b	Ud		Ladrillo cerámico hueco doble, para revestir, 50x20x7 cm, para uso en fábrica protegida (pieza P), densidad 780 kg/m³, según UNE-EN 771-1.	10	0,81	8,1	
mt09eyc010	kg		Pegamento de escayola.	9,035	0,28	2,5298	
				Subtotal materiales:		**10,6298**	
2			Mano de obra				
mo021	h		Oficial 1ª construcción en trabajos de albañilería.	0,1743	22,53	3,926979	
mo114	h		Peón ordinario construcción en trabajos de albañilería.	0,0868	21,19	1,839292	
				Subtotal mano de obra:		**5,766271**	
3			Costes directos complementarios				
	%		Costes directos complementarios	2	16,396071	0,32792142	
Coste de mantenimiento decenal: 0,39€ en los primeros 10 años.					**Costes directos** (1+2+3):	16,72399242	

Al estar machihembrado, la junta se simplifica y reduce la mano de obra. 16,72€/m^2

Se hace una observación y es que el precio de puesta en obra del prefabricado de yeso no es de 0,81 €/ud, puede ser menor pues los costes de fabricación, como ya se ha indicado anteriormente son menores. El precio de este elemento está entre 0,3-0,6 €/ud según nivel de producción, de transporte y de suministro del yeso (materia prima) aun así, se mantiene este precio para la comparativa.

2.3. Partida de revestimientos.

2.3.1. Guarnecido/enfoscado de yeso. Formación de revestimiento continuo interior de yeso, a buena vista, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura, de 12/15 mm de espesor, formado por una capa de guarnecido con pasta de yeso de *construcción B1, aplicado sobre los paramentos a revestir, con maestras solamente en las esquinas, rincones, guarniciones de huecos y maestras intermedias para que la separación entre ellas no sea superior a 3 m. Incluso colocación de guardavivos de plástico y metal con perforaciones, remates con rodapié, formación de aristas y rincones, guarniciones de huecos,*

colocación de malla de fibra de vidrio antiálcalis para refuerzo de encuentros entre materiales diferentes en un 10% de la superficie del paramento y montaje, desmontaje y retirada de andamios. Espesor 15 mm

Tabla 6. Guarnecido maestreado. https://carm.generadordeprecios.info/

RPG010	**m²**	**Guarnecido de yeso.**			
Guarnecido de yeso de construcción B1 maestreado, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura, previa colocación de malla antiálcalis en cambios de material, con guardavivos.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	**Precio unitario**	Importe
1		Materiales			
mt28vye020	m²	Malla de fibra de vidrio tejida, antiálcalis, de 5x5 mm de luz de malla, flexible e imputrescible en el tiempo, de 70 g/m² de masa superficial y 0,40 mm de espesor de hilo, para armar yesos.	0,105	0,76	0,08
mt09pye010b	m³	Pasta de yeso de construcción B1, según UNE-EN 13279-1.	0,015	148,5	2,23
mt28vye010	m	Guardavivos de plástico y metal, estable a la acción de los sulfatos.	0,215	0,35	0,08
			Subtotal materiales:		**2,39**
2		Mano de obra			
mo033	h	Oficial 1ª yesero.	0,281	22,53	6,33
mo071	h	Ayudante yesero.	0,166	21,78	3,62
			Subtotal mano de obra:		**9,95**
3		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2	12,34	0,25
Coste de mantenimiento decenal: 2,14€ en los primeros 10 años.				**Costes directos** (1+2+3):	12,59

El precio de esta partida, depende de que esté o no maestreado, pudiendo llegar a 7,37€/m^2 en el caso de no aplicar este sistema de nivelación, o 12,59€/m^2 en el caso de considerar la opción de maestreado. Si el espesor se reduce a 12mm en vez de 15mm, el precio, es de 12,13€/m^2 para la opción de maestreado. Pero, esta partida no queda así, ya que se necesita de un enlucido de terminación.

2.3.2. Enlucido de yeso. Formación de revestimiento continuo interior de yeso, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura, de 3 mm de espesor, formado por una capa de enlucido con pasta de yeso de aplicación en capa fina C6, que constituye la terminación o remate, aplicado sobre una superficie previamente guarnecida (no está incluido en el precio la capa de guarnecido). Incluso, remates con rodapié, y montaje, desmontaje y retirada de andamios.

Tabla 7. Enlucido 3mm. https://carm.generadordeprecios.info/

RPG011	m²	Enlucido de yeso. Espesor 3mm				
Enlucido de yeso de aplicación en capa fina C6, en una superficie previamente guarnecida, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura.						
Código		Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1			Materiales			
mt09pye010a		m³	Pasta de yeso para aplicación en capa fina C6, según UNE-EN 13279-1.	0,003	166,7	0,5
				Subtotal materiales:		0,5
2			Mano de obra			
mo033		h	Oficial 1ª yesero.	0,053	22,53	1,19
mo071		h	Ayudante yesero.	0,026	21,78	0,57
				Subtotal mano de obra:		1,76
3			Costes directos complementarios			
		%	Costes directos complementarios	2	2,26	0,05
Coste de mantenimiento decenal: 0,39€ en los primeros 10 años.					Costes directos (1+2+3):	2,31

Precio: 2,31€/m^2. Podríamos optar por la opción más industrial de emplear yeso proyectado con máquina.

2.3.3. Yeso proyectado. Formación de revestimiento continuo interior de yeso de construcción B1, proyectado, a buena vista, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura, de 15 mm de espesor, formado por una capa de guarnecido con pasta de yeso de construcción B1, aplicada mediante proyección mecánica sobre los paramentos a revestir, acabado enlucido con yeso de aplicación en capa fina C6. Incluso colocación de guardavivos de plástico y metal con perforaciones, formación de rincones, guarniciones de huecos, remates con rodapié, colocación de malla de fibra de vidrio antiálcalis para refuerzo de encuentros entre materiales diferentes en un 10% de la superficie del paramento y andamiaje.

Tabla 8. Proyectado. https://carm.generadordeprecios.info/

RPG015	m²	Yeso proyectado.				
Revestimiento de yeso de construcción B1, proyectado, maestreado, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura, previa colocación de malla antiálcalis en cambios de material, acabado enlucido con yeso de aplicación en capa fina C6, de 15 mm de espesor, con guardavivos.						
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe	
1		Materiales				
mt28vye020	m²	Malla de fibra de vidrio tejida, antiálcalis, de 5x5 mm de luz de malla, flexible e imputrescible en el tiempo, de 70 g/m² de masa superficial y 0,40 mm de espesor de hilo, para armar yesos.	0,105	0,76	0,08	

mt09pye010c	m³	Pasta de yeso de construcción para proyectar mediante mezcladora-bombeadora B1, según UNE-EN 13279-1.	0,012	196,5	2,36
mt28vye010	m	Guardavivos de plástico y metal, estable a la acción de los sulfatos.	0,215	0,35	0,08
mt09pye010a	m³	Pasta de yeso para aplicación en capa fina C6, según UNE-EN 13279-1.	0,003	166,7	0,5
		Subtotal materiales:			**3,02**
2		Equipo y maquinaria			
mq06pym010	h	Mezcladora-	0,343	8,52	2,92
		Subtotal equipo y maquinaria:			**2,92**
3		Mano de obra			
mo033	h	Oficial 1ª yesero.	0,263	22,53	5,93
mo071	h	Ayudante yesero.	0,153	21,78	3,33
		Subtotal mano de obra:			**9,26**
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes	2	15,2	0,3
Coste de mantenimiento decenal: 2,64€ en los primeros 10 años.			**Costes directos** (1+2+3+4):		15,5

Del mismo modo anterior, el precio depende de si la pared se quiere maestreada o no, siendo 11,66€/m^2 para la opción más barata, y de 15,50€/m^2 si es maestreado. La opción de emplear cemento, sólo la comentamos, si bien, el cemento necesita de una terminación de yeso final, por tanto, el precio no va a ser competitivo.

2.3.4. Enfoscado de cemento sobre paramento interior. Formación de revestimiento continuo de mortero de cemento, tipo GP CSII W0, a buena vista, de 15 mm de espesor, aplicado sobre un paramento vertical interior hasta 3 m de altura, acabado superficial rugoso, para servir de base a un posterior revestimiento. Incluso, formación de juntas, rincones, maestras con separación entre ellas no superior a tres metros, aristas, mochetas, jambas, dinteles, remates en los encuentros con paramentos, revestimientos u otros elementos recibidos en su superficie. Precio 15,03€/m2

2.3.5. Seguimos con el precio del enlucido de 6mm para la terminación del bloque de yeso vibro comprimido.

Tabla 9. Enlucido 6mm. https://carm.generadordeprecios.info/

RPG011	**m²**	**Enlucido de yeso. Espesor 6mm**			
Enlucido de yeso de aplicación en capa fina C6, en una superficie previamente guarnecida, sobre paramento vertical, de hasta 3 m de altura.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	**Precio unitario**	Importe
1		Materiales			
mt09pye010a	m³	Pasta de yeso para aplicación en capa fina C6, según UNE-EN 13279-1.	0,006	166,7	1,0002
			Subtotal materiales:		**1,0002**

2		Mano de obra			
mo033	h	Oficial 1ª yesero.	0,053	22,53	1,19
mo071	h	Ayudante yesero.	0,026	21,78	0,57
			Subtotal mano de obra:		**1,76**
3		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2	2,43	0,05
Coste de mantenimiento decenal: 0,42€ en los primeros 10 años.				**Costes directos** (1+2+3):	2,8102

El precio de esta partida, siguiendo los mismos criterios, es de 2,81€/m^2

3. Resumen de Resultados

Con relación a la tabiquería, se han considerado varios formatos. Como se observa:

Tabique gran formato 50x20x7. 19,25€/m^2

Tabique cerámico pequeño formato 33x16x7. 20,83€/m^2

Tabique de yeso laminado 7cm de espesor sin aislamiento. 32,25€/m^2

Tabique de yeso laminado 7cm de espesor con aislamiento. 42,32€/m^2

Guarnecido/enfoscado de yeso. El precio de esta partida, depende de que esté o no maestreado, pudiendo llegar a 7,37€/m^2 en el caso de no aplicar este sistema de nivelación, o 12,59€/m^2

Enlucido de yeso. Precio: 2,31€/m^2

Yeso proyectado. Requiere maestreada o no, siendo 11,66€/m^2 para opción más barata, y 15,50€/m^2 si es maestreado

Enfoscado de cemento sobre paramento interior. Precio 15,03€/m^2

Enlucido 6mm. 2,81 €/m^2

Tabla 10. Resultados

		Revestimiento			
	Material y colocación	Cara 1	Cara 2	Precio enlucido 1 cara €/m2	Precio a doble cara €/m^2
Tabique cerámico gran formato 50x20x7	19,25	14,44	14,44	33,69	48,13
Tabique cerámico 33x16x7	20,83	14,44	14,44	35,27	49,71
Tabique de yeso laminado 7cm de espesor sin aislamiento.	32,25			32,25	32,25

Tabique de yeso laminado 7cm de espesor con aislamiento	42,32			42,32	42,32
Prefabricado vibro comprimido de yeso de gran formato.	16,72	2,81	2,81	19,53	22,34

4. Discusión

Se hace una observación y es que el precio de puesta en obra del prefabricado de yeso no es de 0,81€/ud, puede ser menor pues los costes de fabricación, como ya se ha indicado anteriormente son menores. El precio de este elemento está entre 0,3-0,6€/ud según nivel de producción, de transporte y de suministro del yeso (materia prima) aun así, se mantiene este precio para la comparativa. El precio del bloque de yeso vibro comprimido de yeso y de gran formato. Al estar machihembrado, la junta se simplifica y reduce la mano de obra, como se ha indicado. 16,72€/m^2

La segunda observación, se refiere a la terminación. En el caso del tabique de yeso laminado, consideramos que no es necesario ningún enlucido y que se refiere el precio, al producto terminado en el que se incluye el enmasillado.

Si bien, la pintura final se encarece por la absorción del panel de yeso debiendo de aplica más capas.

Si tomamos la referencia del yeso proyectado con máquina que incluye las dos partes guarnecido/enfoscado más la terminación de enlucido. Con un total según el cuadro de precios de la construcción normalizados de 15,50€/m^2 por considerar este como maestreado (colocación de rastreles para conseguir una buena nivelación de la pared terminada). Esta proyección incluye 12+3cm. Si vamos al caso de guarnecido más enlucido manual, el precio es ligeramente menor: 12,13€/m2+2,31€/m^2 del enlucido=14,44€. En nuestro caso (prefabricado vibro comprimido), ya partimos de 15mm de espesor de yeso de la pared del prefabricado, por tanto, la capa de enfoscado se puede descartar, y simplemente considerar un enlucido en vez de 3mm, de 5 o 6 mm. Como se observa, es más barata la opción de un guarnecido de 12mm más un enlucido de 3mm, sin emplear el sistema de proyección.

Para un enlucido de 6cm, como terminación final del bloque de yeso vibro comprimido, pasamos a un precio final de 2,81€/m^2.

Con relación al enfoscado de cemento, también empleado en obra, el precio también nos lleva a 15,03€/m2, pero dicho acabado será rugoso y dispuesto a recibir una terminación posterior, por ejemplo, enlucido de yeso. Este sistema no lo consideramos por alejarse aún más de la comparativa final.

5. Conclusiones

A pesar de mantener el precio de referencia del bloque de yeso vibro comprimido de 0,81€/ud igual que el de la cerámica de gran formato (sin tener en cuenta que la diferencia en energía aportada para la fabricación del elemento por vibro compresión, comparado con la cerámica, que se reduce entre el 90-95%), se observa, en la ejecución final, también existe un ahorro significativo de mano de obra y de materiales marcando un precio de ejecución muy alejado de los materiales convencionales.

Así, se obtiene un ahorro del 54% respecto del tabique de cartón yeso con aislamiento, un 39% sin dicho aislamiento, un 45% con respecto del cerámico, y un 42% con el cerámico de gran formato.

Con relación al uso de enlucido, un 55% con el cerámico, 54% con el gran formato, un 47% para el cartón yeso con aislamiento y un 31% sin aislamiento

Roles:

Jose A. Flores Yepes. Conceptualización e investigación.

Antonio Martínez Gabarrón. Análisis formal y validación

Juan Manuel Berna Serna. Análisis formal y de metodología

Carlos Antonino Cabrera. Doctorando. Análisis de recursos, estudio de materiales.

Ana María Codes. Visualización y escritura.

Referencias

1. UNE 13279-1:2006. Yesos para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. AENOR.
2. Buitrago Caicedo, Mónica. Plan de negocio para la creación de una ladrillera tipo refractarios en el municipio de San Andrés de Tumaco. Universidad de Nariño; 2015. Disponible en: https://sired.udenar.edu.co/1144/1/91220.pdf
3. Guillen Coello, Hernán. Análisis de factibilidad para una fábrica de ladrillos para la construcción. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador; 2011.
4. UNE-EN 772-1 + A1:2016. Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Resistencia a compresión. AENOR.
5. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Factores de conversión energía final-energía primaria y factores de emisión de CO2. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; 2010.
6. Ruiz De La Cruz, D. Auditoría energética de una industria cerámica de fabricación de tejas y ladrillos. Universitat Politècnica de València; 2016.
7. Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón (ANDECE). Manual técnico del prefabricado de hormigón. ANDECE; 2012. Disponible en: https://www.andece.org/publicaciones-andece
8. CYPE Ingenieros. Generador de precios de la construcción. Región de Murcia. Disponible en: https://carm.generadordeprecios.info/

Metodología para la valoración de edificios agrarios

Jordi Massana[1], Francisco Ayuga[1], Diego González-Conde[2], Eutiquio Gallego[1], José María Fuentes[1] y Francisco Alonso[1,*]

[1] Grupo de Investigación Edificación, Infraestructuras y Proyectos para la Ingeniería Rural y Medioambiental (EIPIRMA). Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid

[2] Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística. Subsecretaría. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España

* Correspondence: paco.alonso.peralta@upm.es

Resumen: El trabajo tuvo como objetivo estudiar y desarrollar una metodología para la valoración de edificios agrarios, con el fin de calcular los costes de amortización en función de la producción. Esta metodología ha sido extrapolada a industrias alimentarias, específicamente para bodegas y almazaras, y a explotaciones ganaderas, como las de porcino, ovino, vacuno, gallinas de puesta y pollos de engorde. Estos edificios son esenciales para el funcionamiento de diversas actividades agrícolas y ganaderas, por lo que una valoración adecuada es clave para el cálculo de los costes de amortización. La metodología contempla desagregar los proyectos en sus diferentes elementos para obtener una valoración precisa debido a la heterogeneidad y singularidad de estas actividades. Se ha tomado como base el tamaño de la industria o explotación ganadera. En primer lugar, se dimensionan las superficies necesarias para cada proceso productivo, y se definen las tipologías de los edificios en función de sus necesidades específicas. En el caso de las industrias agrarias, se dimensionan en planta las distintas fases de producción, y los equipos o líneas de trabajo necesarias. En las explotaciones ganaderas, se ha tenido en cuenta la normativa de bienestar animal para dimensionar los alojamientos. Se han calculado los costes unitarios de distintos tipos de edificios, utilizando Cuadros de Precios de Construcción. Para la maquinas y equipos necesarios, se utilizaron los precios medios de mercado, y se han contrastado con proyectistas especializados. Posteriormente estos costes unitarios se han desagregado en precios simples agrupándolos por su naturaleza a efectos del desarrollo de fórmulas de actualización del coste de la edificación e instalaciones, mediante los índices de actualización de precios del Instituto Nacional de Estadística. Este enfoque integral ofrece una metodología flexible y detallada para valorar diferentes tipos de edificios agrarios.

Palabras clave: Metodología, Valoración, Edificios agrarios, Ratios de amortización.

1. Introducción

La valoración de edificios agrarios es una temática singular que difiere de la clásica valoración inmobiliaria donde se calcula el valor a nuevo mediante Método del Coste de Reposición [1, 2] o del Módulo de Valor Básico de Construcción (MBC) en función del catálogo de edificaciones tipo de la normativa de valoración catastral [3].

En estas metodologías se calcula únicamente el valor de la edificación tipo y no se entra en detalles del valor de instalaciones, equipos y maquinaria que, en muchas ocasiones pueden considerarse como bienes muebles. La Valoración Catastral se utiliza para calcular el valor total del inmueble (Suelo + Vuelo) para establecer la Base impositiva del importe del Impuesto de Bienes Inmuebles; y se hace mediante una ponencia de valores que es una valoración colectiva y no individualizada.

Por otro lado, en valoración para entidades financieras el valor del inmueble, en muchas ocasiones, se calcula mediante el Método de Comparación en función del mayor y mejor uso, y las edificaciones por el Método del Coste Reposición corregido en función de la antigüedad y el estado de conservación [1,2].

En edificios vinculados a actividades económicas con procesos productivos como son la industria agroalimentaria y las explotaciones ganaderas es vital conocer el Valor a Nuevo del edificio con instalaciones y equipos para determinar el valor de la amortización, que forma parte de los costes fijos de producción y los costes de mantenimiento [4].

En este sentido se ha desarrollado una Metodología flexible capaz de desagregar los proyectos en sus diferentes elementos para obtener una valoración precisa, en función de las características medias de los procesos productivos. Esto permite calcular las superficies necesarias para el desarrollo de la actividad, la tipología de edificios con sus instalaciones, equipos y maquinaria. Además, se identifican los elementos comunes inherentes a la actividad. Una vez dimensionado el conjunto de la actividad se asigna a cada tipología de edificio, equipo o depósito un precio de referencia. Esto permitirá obtener un valor total del proyecto sin incluir el valor del suelo, los honorarios de proyectista y dirección facultativa, ni licencias de obra.

Esta metodología debe ser una herramienta viva cuyos resultados se puedan extrapolar a futuro mediante índices de actualización de precios [5].

2. Materiales y métodos

2.1. Tipología de edificios estudiados

Las tipologías de edificios agrarios para los que se ha desarrollado esta metodología de valoración han sido las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tipología de edificios agrarios estudiados.

Tipologías		**Tamaño**
Industrias Agroalimentarias	Bodegas	< 4 000 t
	Almazaras	500 – 2 000 t
Explotaciones Ganaderas	Porcino: madres y lechones	200 – 500 plazas
	Porcino: lechones destete-transición	< 4 000 plazas
	Porcino: cebo	< 2 000 plazas
	Vacuno: lechero	160 – 400 vacas
	Vacuno: cebo de terneros	200 – 500 terneros
	Ovino: lechero	400 – 1 200 ovejas
	Ovino: cebo de corderos	< 2 000 corderos
	Avícola: puesta	< 15 000 – 40 000 gallinas
	Avícola cebadero de pollos	< 30 000 pollos

2.2. Definición de las características de la explotación

En primer lugar, se estudia el proceso productivo para identificar las diferentes etapas del proceso y las áreas funcionales con los equipos necesarios. En la figura 1 se muestra, como ejemplo, el proceso productivo considerado en el caso de las almazaras.

Posteriormente, para el dimensionamiento y valoración de los edificios, en el caso de industrias alimentarias, se debe conocer la producción anual de materia prima a procesar, la duración de la campaña de recogida y la duración de la jornada de trabajo (tanto de recepción, como de molturación) y el porcentaje de producto final a embotellar. De esta manera se pueden dimensionar las superficies de edificios, las líneas de procesado con sus equipos y rendimientos, los depósitos de almacenamiento y los equipos de envasado en función de los datos de partida.

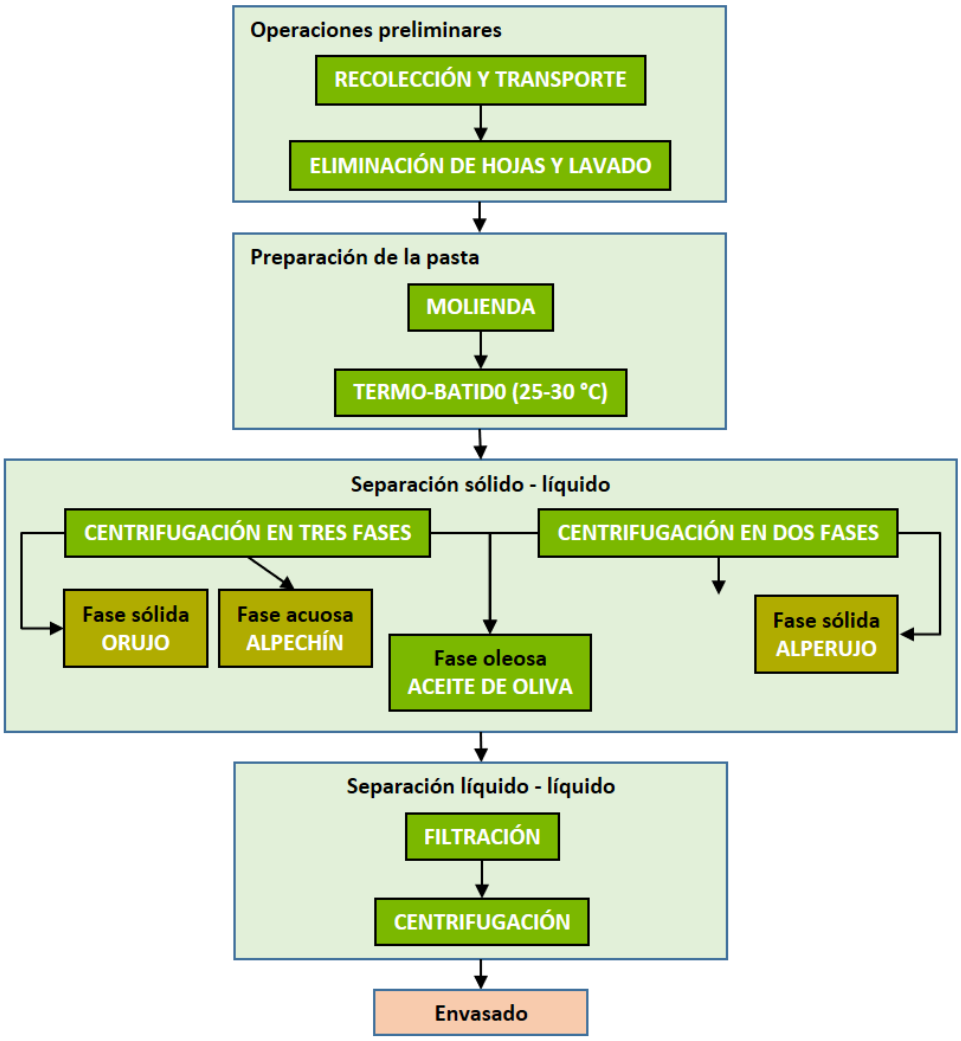


Figura 1. Proceso de productivo de obtención del aceite de oliva: sistemas de dos y tres fases.

En el caso de explotaciones ganaderas será necesario fijar el número de plazas de la explotación y las superficies de suelo libre por animal, atendiendo a los valores establecidos en las normativas de bienestar animal [6, 7, 8]. Además, en el caso de explotaciones lecheras hay que fijar el número de ordeños por día, el tiempo total dedicado a la rutina de ordeño y la frecuencia de retirada de la leche. Se consigue así dimensionar la sala de ordeño y la lechería tanto en superficies como en equipos.

Por último, en todas las explotaciones ganaderas, se dimensiona la fosa de purines o un estercolero en función de la producción media de residuos, de acuerdo a los valores de la normativa específica o generalista [9, 10, 11].

Además, en esta metodología se han considerado unas zonas comunes consistentes en un edificio administrativo y de uso para el personal, superficies de patios, accesos y vallados, repercutiendo una superficie unitaria en función del tamaño de la actividad.

En la tabla 2 se muestran como ejemplo, los datos básicos de entrada para una almazara.

Tabla 2. Datos básicos de entrada necesarios en el caso de las almazaras.

Simbología	Descriptor	Unidades
P	Producción anual de aceituna	t
%1	Porcentaje del volumen total de sobrealmacenaje, para enlazar campañas	%
%2	porcentaje de aceite a embotellar	%
j1	Duración de la jornada laboral en la recepción de la aceituna (incluido limpieza y lavado)	h
j2	Duración de la jornada laboral en la extracción	h
j3	Días de recolección de la aceituna (Duración de la campaña de recolección)	días
☑	Checkbox para optar por equipo de deshuesado	

En el caso de una explotación ganadera para vacuno de leche, los datos de entrada necesarios son los que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Datos básicos de entrada necesarios en el caso de explotación de vacuno de leche.

Simbología	Descriptor	Unidades
N	Número de plazas totales	vacas
S_O	Superficie de suelo libre por plaza de ordeño	m^2
S_{NS}	Superficie de suelo libre por plaza de vaca seca y novilla	m^2
☑	Checkbox para seleccionar sala de ordeño (en caso contrario se considera robot de ordeño)	
N_o	Número de ordeños por día	ordeños/día
T_{to}	Tiempo total de ordeño	horas/ordeño
f_L	Frecuencia de retirada de la leche	días
☑	Checkbox para seleccionar silos trinchera	
$\%E_M$	Porcentaje de ensilado de maíz en la ración	%
f_v	Frecuencia de vaciado de la fosa de purines	meses
H_f	Profundidad de la fosa	m

2.3. Cálculo de precios unitarios de edificios y equipos

Se han calculado los costes unitarios para distintas tipologías de edificios, en función del tipo de estructura, cerramiento y cubierta, solados e instalaciones eléctricas, de abastecimiento de agua y saneamiento.

Los precios unitarios de las unidades de obra se han obtenido fundamentalmente, del Cuadro de Precios de la Construcción Centro 2023. [12]. Precio Centro es una de las bases de datos de precios de la construcción más utilizada en España desde el año 1984.

Por otro lado, para las máquinas y equipos se han obtenido precios medios de mercado. Estos valores se han contrastado con proyectistas especializados en cada una de las temáticas.

Hay que indicar que el mercado de máquinas y equipos para las industrias agroalimentarias y explotaciones ganaderas es un mercado opaco, en el que únicamente se refleja el precio del suministro a pie de obra. Por este motivo, al precio del equipo hay que repercutirle los costes de instalación y los costes de puesta en marcha, que incluyen mano de obra, maquinaria de elevación y materiales para su instalación.

De esta manera, la metodología se mantiene viva y se pueden actualizar los precios finales, del edificio o de la máquina y equipo a través de los índices de actualización de los precios industriales del INE [5].

Los índices de precios en los que se han desagregado los precios unitarios son los que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Factores considerados en la descomposición de los precios unitarios.

Precios unitarios: edificios con instalaciones y equipos		**Índices de precios**
Obra civil y edificaciones	**Unidades de obra**	Mano de obra
		Maquinaria
		Materiales metálicos
		Hormigón, ladrillos y otros materiales
	Instalación eléctrica	Aparellaje eléctrico
		Cables eléctricos
	Instalación fontanería y saneamiento	Grifería y valvulería
		Tubos de plástico
Máquinas y equipos	**Equipos y máquinas**	Grandes depósitos
		Resto de equipos
	Instalación y puesta en marcha	Mano de obra
		Maquinaria
	Instalación eléctrica	Aparellaje eléctrico
		Cables eléctricos
	Instalación fontanería y saneamiento	Grifería y valvulería
		Tubos de plástico

2.4. Presupuesto

Por último, se calcula un presupuesto total, por áreas de trabajo, con un resumen por capítulos de zonas comunes y cada una de las zonas funcionales condicionadas por el proceso productivo.

Conocido el presupuesto se puede calcular el coste de la amortización de la actividad en función del tamaño de la misma, aplicando una vida útil al proyecto. En caso de industrias, se hace en función del volumen total anual (€/litro), y en el caso de las explotaciones ganaderas se obtiene una ratio por plaza (€/plaza).

Resultados

La metodología es una herramienta eminentemente práctica, que permite hasta el momento, calcular el valor medio de construcción de edificios agrarios para los 10 tipos de explotación indicados anteriormente. A continuación, se muestran los resultados para el caso de una almazara.

A partir del diagrama del proceso productivo (Figura 1), se establecen las distintas fases del proceso, que llevan asociadas zonas distintas de trabajo. La singularidad de cada zona es función del dimensionamiento de los distintos equipos y las superficies necesarias para albergarlos. De esta manera se diferencian las siguientes zonas con sus máquinas y equipos:

Tabla 5. Zonas, máquinas y necesidades de obra en almazaras.

Zona	Equipos / máquinas	Necesidades de edificación y obra civil
Patio de recepción	**Sistema compacto:** – Tolva de recepción – Cinta transportadora – Deshojadora – Lavadora	- Foso de 4 m de profundidad - Solera de hormigón para zona de patio descubierto
	Báscula de pesado de aceituna limpia	
	Equipo de muestreo	
	Tolvas de espera para aceituna limpia	
Extracción en 2 fases	**Equipo compacto:** – Molino – Termobatidora – Bomba de trasiego – Decantador horizontal – Bomba de alperujo – Centrífuga vertical	- Nave de estructura metálica cerrada a dos aguas, con solera de hormigón e instalaciones incluidas.
	Deshuesadora de alperujo	- Solera de hormigón
	Tolvas de alperujo	
Zona de bodega de aceite a granel	Depósitos de decantación	- Nave de estructura metálica cerrada a dos aguas, con solera de hormigón e instalaciones incluidas.
	Depósitos de almacenamiento	
Zona de embotellado de aceite	**Línea de embotellado:** – Embotelladora – Etiquetadora – Taponadora – Encajadora – Paletizadora	- Nave de estructura metálica cerrada a dos aguas, con solera de hormigón e instalaciones incluidas.
	Almacén	

A continuación, se adjuntan los resultados de un caso práctico de valoración de una almazara con capacidad de molturar 1.500 t de aceituna por campaña, que es una almazara de tamaño medio en España.

Datos de entrada:

Conocidos los datos básicos de entrada se calculan: Volumen total de aceite granel producido, entradas medias y máximas de aceituna diaria, para dimensionar las líneas de recepción y limpieza.

	Concepto	Cantidad	unidades
GENERALIDADES	**Producción anual (aceituna)**	**1500**	t
	Volumen total de aceite granel producido	311.135	l
	Sobrealmacenaje. Porcentaje sobre volumen total	**20**	%
	Volumen de sobrealmacenaje	62.227	l
	Porcentaje de aceite a embotellar	**100**	%
	Jornada para la recepción de aceituna en la almazara	**8**	h/día
	Jornada para la extracción	**12**	h/día
	Días de recolección (Duración de la campaña de recolección)	**30**	días
	Entrada media de aceituna diaria	50,0	t/día
	Entrada máxima diaria de aceituna	60,0	t/día
	Entrada máxima de aceituna por hora	15,0	t/h

Figura 2. Caso: Almazara para 1500 t/año. Datos de entrada y cálculos generales

Zona: Patio de recepción

En esta fase del proceso productivo se dimensiona el número de líneas de recepción, limpieza y lavado en función de la entrada máxima de aceituna por hora, eligiéndose los equipos compactos de acuerdo a los rendimientos estándares del mercado (8, 18 o 45 t/h). Se dimensiona la superficie necesaria para el patio, considerando zonas de maniobra de los tractores en las zonas de descarga.

Concepto			Cantidad	unidades
PATIO	Recepción + limpieza y lavado + pesado	SISTEMA COMPACTO: Tolva de recepción + cinta transportadora+ deshojadora + lavadora	45/18/8	t/h
		Rendimiento del Sistema compacto limpiadora/lavadora	18	t/h
		Nº de líneas	1	Ud
	Almacenamiento	Peso de aceituna limpia diaria	47,5	t/día
		Nº de tolvas	2	Ud
		Tolvas para 25 t (40 m^3) o 50 t (75 m^3) de aceituna limpia	25	t aceituna/tolva
	Superficie del patio		400	m^2

Figura 3. Caso: Almazara para 1500 t/año. Dimensionamiento de la zona del patio de recepción.

Zona: Extracción de aceite en dos fases

En esta fase del proceso productivo se dimensionan el número de líneas de extracción considerando equipos compactos de 4, 8 y 10 t/h, en función de la cantidad de aceituna procesada por hora. Se calcula el volumen de alperujo

producido y las tolvas necesarias se eligen con capacidades para 25 o 50 t. En el caso de optar por instalar una deshuesadora, se calculan el número de equipos necesarios, considerando rendimientos de 4 o 7 t/h. Para el alperujo deshuesado se consideran también tolvas de 25 o 50 t.

Concepto			**Cantidad**	**unidades**
EXTRACCIÓN DE ACEITE 2 FASES	Línea de extracción	Cantidad de aceituna procesada por hora	5	t/h
		Rendimiento de la línea (Molino triturador + termobatidora + bomba de trasiego + decanter + bomba de orujo + centrífuga vertical)	8	t/h
		Nº líneas de extracción	1	Ud
	Molino	Rendimiento del molino	8	t/h
	Extracción sólido/líquido (decantador horizontal)	Rendimiento teórico del decnter	8	t pasta/h
	Extracción líquido/líquido (centrífuga vertical)	Rendimiento de la centrífuga vertical	1.600	l/h
	Tolvas de alperujo	Volumen diario de alperujo	43	m^3
		Nº de tolvas alperujo	1	Ud
		Tipo tolvas de alperujo (25 t (40 m^3) o 50 t (75 m^3))	75	m^3/tolva
	EQUIPO DE DESHUESADO		☑SI	**Verdadero**
	Deshuesadora	Nº líneas de deshuesado	1	
		Peso de alperujo a procesar	38	t/día
		Peso de hueso a almacenar	3,8	t/día
		Rendimiento de la deshuesadora	4	t/h
	Alperujo deshuesado	Volumen de alperujo deshuesado	38,0	m^3/día
		Nº de tolvas alperujo deshuesado	1	Ud
		Tolva para alperujo deshuesado (25 t (40 m^3) o 50 t (75 m^3))	75	m^3
	EDIFICIO		200	m^2

Figura 4: Caso: Almazara para 1500 t/año. Dimensionamiento de la zona de extracción.

Zona: Bodega

Se calcula el volumen diario de aceite a decantar, considerando un tiempo de decantación de 24 h. Se dimensionan depósitos de decantación con volúmenes de 5.000 l.

El aceite total a almacenar en la campaña será el aceite decantado y el sobrealmacenamiento considerado para el enlace de campañas. Con ello se calcula el número de depósitos de almacenamiento necesarios, considerando depósitos de 15.000, 25.000 y 50.000 litros.

La zona de la bodega se instalará en un edificio cerrado y una superficie de 22 m^2 por depósito.

Concepto		Cantidad	unidades
BODEGA	Volumen de aceite a decantar en bodega	10.371	l/día
	Nº de depósitos de 5.000 l de decantación	3	Ud
	Volumen total de aceite a almacenar en la campaña	311.135	l/campaña
	Volumen de sobrealmacenaje	62.227	l
	Volumen total en la bodega	373.362	l
	Tipo de depósito de almacenamiento	50000	l
	Nº de depósitos	8	Ud
	Superficie de la nave	176	m^2

Figura 5: Caso: Almazara para 1500 t/año. Dimensionamiento de la zona de bodega.

Zona: Embotellado

Se ha considerado un equipo compacto de embotellado, encajado y paletizado, con un rendimiento de 1.100 l/h con una jornada de trabajo de 6 h útiles día. Se establece una única línea de embotellado, con dos depósitos pulmón.

Se calcula el número de días necesarios para el embotellado a partir de la cantidad de aceite a embotellar al año y del rendimiento de la línea. Además, para estimar la superficie del almacén, se considera un tiempo medio de almacenaje igual a 1/5 del tiempo de embotellado.

Dentro del almacén se calcula el número de estanterías, considerando una estantería estándar para 15 palets en tres alturas.

Por último, se dimensiona la superficie de la nave de la zona de embollado y almacenaje, considerando 150 m^2 por línea de embotellado, más 14,10 m^2 por estantería de almacenaje incluida la parte proporcional de los pasillos.

Concepto			Cantidad	unidades
EMBOTELLADO	Embotellado	Cantidad de aceite a embotellar	311.135	l
		Nº de días para tareas de embotellado (jornadas de 8 horas)	48	días
		Nº depósitos pulmón (15.000 l)	2	Ud
		Nº Líneas de embotellado (rendimiento 1.100 l/h)	1	Ud
	Almacén	Nº palets por día (216 litros aceite/palet)	41	Ud
		Tiempo medio de estancia de las botellas en almacén	10	días
		Nº Estanterías 4,70x1,10m (3 alturas, 15 palets)	28	Ud
	Superficie nave embotellado/almacén		545	m^2

Figura 6: Caso: Almazara para 1500 t/año. Dimensionamiento de la zona de embotellado.

Finalmente, se calcula el presupuesto total de la almazara y el ratio de amortización por litro de aceite producido.

ZONAS			Importe (€)
Zonas comunes	Total zonas comunes		185.968
Almazara	Patio /recepción		232.584
	Extracción aceite 2 fases		344.000
	Bodega aceite a granel		278.460
	Embotellado		273.879
	Presupuesto total almazara		1.314.891
	Volumen total producido (l)		311.135
	Amortización 30 años	RATIO (€/l)	0,1409

Figura 7: Caso: Almazara para 1500 t/año. Presupuesto total y ratio de amortización a 30 años (€/litro aceite).

Conclusiones

1. La singularidad de los proyectos de industrias agroalimentarias y de las explotaciones ganaderas, hace que no se puedan aplicar ni métodos de comparación ni los módulos de valor básico de construcción de catastro.
2. El método del Coste de Reposición a nuevo, nos da un valor total del proceso de construcción, en cambio con la metodología propuesta se busca conocer el coste de construcción sin tener en cuenta los honorarios de proyectista, dirección facultativa ni licencias de obra.
3. El cuadro de precios a utilizar en la metodología, para calcular los costes unitarios de los edificios con instalaciones, no debería afectar al resultado final del valor del edifico ya que todas las bases de datos tienen una estructura y descomposición de precios unitarios similar.
4. La metodología aplicada es lo suficientemente flexible para poderla extrapolar a las tipologías descritas o a otras similares.
5. En una segunda fase habría que validar la metodología con casos reales excluyendo bodegas y almazaras de autor, y explotaciones ganaderas singulares.

Bibliografía

1. BOE. Real Decreto 1492/2011, de 24 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de valoraciones de la Ley de Suelo.
2. Boletín Oficial del Estado (BOE). Orden ECO/805/2003, de 27 de marzo, sobre normas de valoración de bienes inmuebles y de determinados derechos para ciertas finalidades financieras.
3. Real Decreto Legislativo 1/2004, de 5 de marzo, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Catastro Inmobiliario.
4. Red Contable Nacional (RECAN). Metodología y Resultados Empresariales 2022. Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
5. INEbase / Industria, energía y construcción. Instituto Nacional de Estadística (20 de marzo 2025).

6. Real Decreto 159/2023, de 7 de marzo, por el que se establecen disposiciones para la aplicación en España de la normativa de la Unión Europea sobre controles oficiales en materia de bienestar animal, y se modifican varios reales decretos.
7. Real Decreto 692/2010, de 20 de mayo, por el que se establecen las normas mínimas para la protección de los pollos destinados a la producción de carne y se modifica el Real Decreto 1047/1994, de 20 de mayo, relativo a las normas mínimas para la protección de terneros.
8. Real Decreto 1027/2024, de 8 de octubre, por el que se regulan las condiciones de aplicación de la normativa de la Unión Europea de comercialización de huevos.
9. Real Decreto 306/2020, de 11 de febrero, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas porcinas intensivas, y se modifica la normativa básica de ordenación de las explotaciones de ganado porcino extensivo.
10. Real Decreto 1053/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas bovinas.
11. ASAE D384.1 FEB03 Manure Production and Characteristics. American Society of Agricultural Engineers.
12. Generador de precios descompuestos - Precio Centro de la Construcción. Precios de la Construcción Centro. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Guadalajara (21-marzo-2025).

Agradecimientos

El proyecto “Servicios para la Valoración de Edificios e Instalaciones Agrarias (P-1820290353)” ha sido financiado por la Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España.

Estudio de la fricción entre piezas de madera microlaminada de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.)

José Ramón Villar-García [1*], Pablo Vidal-López [2], Desirée Rodríguez-Robles [2], Manuel Moya Ignacio [1], Antonio José Lara-Bocanegra [3], Almudena Majano-Majano [3]

[1] Grupo de Investigación Forestal, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, Cáceres, España; jrvillar@unex.es ; manuelmi@unex.es

[2] Grupo de Investigación Ingeniería Mecánica y Fluidos, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura. Av. Adolfo Suarez s/n, 06071 Badajoz, España; pvidal@unex.es; desireerodriguez@unex.es

[3] Departamento de Estructuras y Física de Edificación, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, España. antoniojose.lara@upm.es ; almudena.majano@upm.es

* Correspondence: jrvillar@unex.es

Resumen: En este análisis se obtienen los coeficientes de fricción de la madera microlaminada (LVL, por sus siglas en inglés) de *Eucalyptus globulus* Labill. El estudio cubre las dos configuraciones posibles, es decir, todas las láminas que conforman el producto con las fibras alineadas en una sola dirección (LVL-L), y con dos de ellas dispuestas transversalmente (LVL-T), además de las diversas caras que pueden generarse por el corte respecto a la orientación de las fibras. El objetivo es obtener valores para los distintos pares de fricción que se pueden presentar en la ejecución de uniones estructurales, dependiendo de la orientación de los planos en las caras enfrentadas. Los valores promedio, sin considerar las orientaciones, fueron 0.54 para el coeficiente de fricción estática y un valor dinámico de 0.38, aunque los valores fueron significativamente más altos para los pares con superficies de mayor rugosidad, especialmente las testas. La madera microlaminada LVL-T mostró valores de fricción ligeramente superiores al LVL-L, aunque ambas oscilan en rangos similares. Los resultados obtenidos ofrecen valores para aplicaciones prácticas, especialmente en simulaciones numéricas, donde los coeficientes de fricción tienen gran importancia para un correcto análisis.

Palabras clave: Rozamiento; tribología; madera microlaminada; LVL; simulación numérica; uniones

1. Introducción

El rozamiento entre elementos está presente en numerosos sistemas estructurales realizados con madera, desde un simple apoyo en un durmiente, hasta el rozamiento entre tablones de una placa tensada, pasando por la transmisión de fuerzas en uniones entre barras de madera. En la transmisión de cargas en

conexiones entre piezas tiene especial relevancia, principalmente en uniones tradicionales, donde son las superficies en contacto las únicas responsables de dicha transmisión. Estudios de distintos autores [1–4] subrayan la importancia de conocer el valor del coeficiente de rozamiento para su simulación numérica rigurosa y para profundizar en el conocimiento de los mecanismos de transmisión de esfuerzos.

1.1. Madera microlaminada o LVL

La madera microlaminada o LVL, del inglés *Laminated Veneer Lumber*, es un material tecnológico derivado de la madera. Se compone de varias capas finas de madera, generalmente de menos de 6 mm de grosor, unidas entre sí con un adhesivo fenólico. El resultado es un panel con una orientación específica de las capas, que ofrece excepcionales características mecánicas y una mayor estabilidad dimensional en comparación con la madera estructural tradicional. El trabajo aquí llevado a cabo forma parte de un estudio más amplio para su aplicación en estructuras laminares reticulares o gridshells, donde el curvado de piezas y su estabilidad dimensional cobra especial importancia. En la ejecución de estas estructuras es común el empleo de madera laminada, pero surgen carencias en cuanto a una resistencia insuficiente para realizar un curvado rápido de las piezas y unas grandes tensiones de deformación. La solución a este problema está en desarrollar un material en formato tablero de una alta resistencia y altas prestaciones mecánicas, para permitir un proceso de curvado en seco, rápido y manteniendo su integridad estructural, lo que se puede conseguir con el microlaminado, en particular de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.).

En una pieza de madera microlaminada podemos diferenciar 3 superficies distintas: tabla, canto y testa, Figura 1. La orientación de las fibras puede ser uniforme en todas las capas, es decir, en la misma dirección (LVL-L), o bien algunas capas pueden girarse, de modo que las fibras se dispongan de manera transversal respecto a las demás (LVL-T) Figura 2.

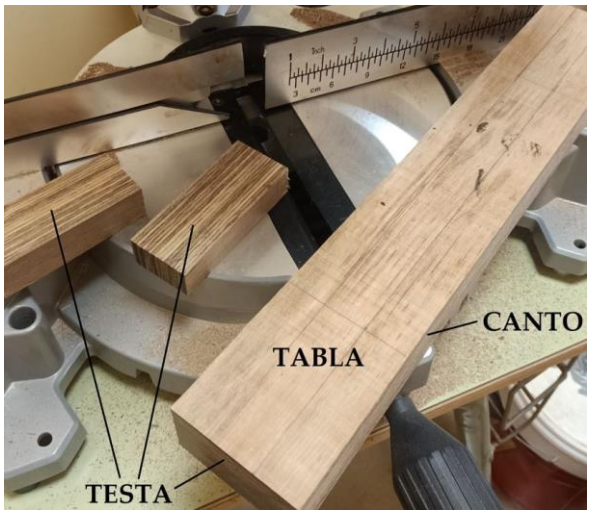


Figura 1. Extracción de muestras para la prueba de fricción en las testas a partir de una viga de microlaminado de *Eucalyptus globulus*, especificando las superficies.

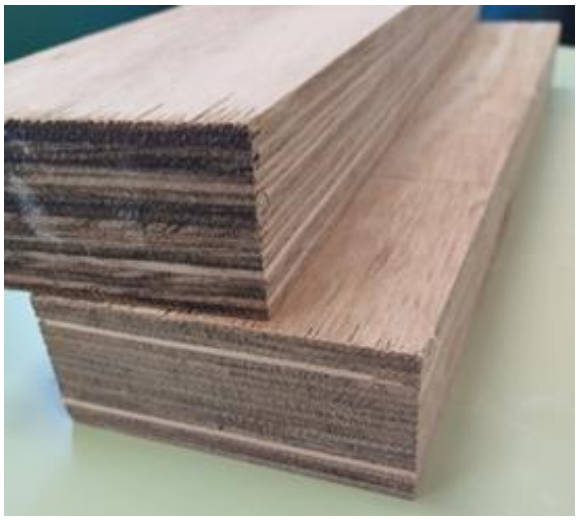


Figura 2. Microlaminado de *Eucalyptus globulus* en configuraciones L (arriba) con todas las capas dispuestas en dirección longitudinal, y T (abajo), en la cual la tercera capa desde la parte superior e inferior (láminas con tono más claro) se orientan en dirección transversal. Al frente están las testas y la parte superior constituye la tabla.

Las especies de madera comúnmente empleadas en la fabricación de LVL son el abeto y el pino. Además, en el mercado europeo se puede encontrar LVL producido a partir de una especie de madera de frondosa, el haya (*Fagus sylvatica*), conocido bajo la marca BauBuche [5]. Este producto es uno de los materiales estructurales de madera con las mejores prestaciones disponibles en el mercado europeo actual.

1.2. Madera Microlaminada de Eucalipto (Eucalyptus globulus Labill)

Los eucaliptos son árboles y arbustos de la familia Myrtaceae, con muchas especies que predominan en Australia y Nueva Zelanda, y otras especies que se extienden por el centro y norte de América y el sur de Europa. En España, el *Eucalyptus globulus* Labill. es una de las especies de frondosas más comunes, con una importante

extensión forestal en regiones como Galicia, Asturias, Cantabria y la provincia de Huelva. La madera microlaminada de eucalipto, surge como propuesta ante la necesidad de un material estructrural adecuado para las estructuras laminares curvadas de madera de la actualidad. Se presenta como una especie alternativa en el sur de Europa al haya centroeuropea predominante en el microlaminado del norte y centro de Europa. En concreto, la madera libre de defectos de *Eucalyptus globulus* presenta resistencias ligeramente superiores a las del haya y rigideces notablemente mayores [6], se considera que el LVL de eucalipto podría lograr valores de propiedades mecánicas iguales o incluso mayores que los del LVL de haya. Además, esta madera con origen español presenta una buena durabilidad según UNE EN 350:2016, similar a la del castaño y el roble y notablemente mejor que la del haya. Se están empezando a apreciar sus ventajas dada, entre otras, su elevada resistencia frente a otros materiales, y ahora mismo se encuentra bajo investigación para conocer más a fondo todas sus cualidades y sus potenciales usos en la industria de la construcción, a lo que podría contribuir el presente trabajo. Se estima que esta madera podría llegar a ser el producto de madera de mayores prestaciones de toda Europa, ideal para aplicaciones en las que sean necesarias estas altas prestaciones, como en las estructuras laminares reticulares, estructuras singulares o elementos más esbeltos.

1.3. El Rozamiento entre Superficies Sólidas

La fuerza de fricción es una de las fuerzas de contacto que, junto con la normal, surge por interacción entre superficies. Esta fuerza de fricción se opone al inicio del deslizamiento o, una vez producido, al movimiento relativo entre dos superficies. Considerando un bloque sólido simplemente apoyado en una superficie, su peso genera una fuerza de contacto normal a la superficie, N, de igual valor, colineal y de sentido contrario. Si actuamos horizontalmente con una fuerza P, aparece en la reacción de la superficie una componente horizontal F que es la resultante de todas las fuerzas de contacto que se producen entre el bloque y la superficie. Mientras el bloque no se mueva, P se ve contrarrestada por F, al aumentar progresivamente P también aumentará F hasta llegar a un valor máximo que se corresponde con el "punto" o "condición de deslizamiento inminente". Superado este punto la fuerza de rozamiento ya no es capaz de contrarrestar el valor de P y se produce el deslizamiento. Este comportamiento a nivel macroscópico es el que se reproduce en los ensayos realizados en el presente trabajo mediante su implementación en laboratorio. La mecánica de sólidos considera, con mucha aproximación que existe una proporcionalidad directa entre la carga normal (N) y la fuerza (F) necesaria para producir deslizamiento y se puede obtener el coeficiente de rozamiento según la Ecuación 1:

$$F = \mu_{e/d} N \quad (1)$$

Donde la constante de proporcionalidad entre N y F recibe el nombre de coeficiente de rozamiento estático μ_e o dinámico μ_d según se trate del valor en el momento inminente de comienzo del deslizamiento o durante el desplazamiento relativo de los sólidos o superficies ensayadas.

En el caso de superficies de madera, los coeficientes de rozamiento dependen, en cuanto al material, del contenido en humedad, de la rugosidad y de las características de la superficie. Estos dos últimos factores, directamente relacionados con las propiedades anatómicas o tecnológicas, como en el caso del LVL, de la dureza de la madera y del mecanizado o tratamiento recibido por las piezas.

El coeficiente de rozamiento no está normalizado como parte de las propiedades mecánicas de la madera, y solo se menciona en la Tabla 6.1 de la EN1995-2:2004 (2016) Eurocódigo 5-Parte 2 [7], pero únicamente para madera aserrada de coníferas. Argüelles et al. [8,9] recopila como valores del coeficiente de rozamiento de 0.25 a 0.7 para fricción estática y 0.15 a 0.4 para el dinámica, indicando que éstos aumentan con el contenido de humedad de la madera, hasta la saturación, permaneciendo constante a partir de este punto. El USDA Forest Products Laboratory [10] también indica que los coeficientes de rozamiento cinéticos para la madera lisa contra superficies duras y lisas pueden variar desde 0.3 a 0.5 en madera seca, con contenido de humedad intermedio de 0.5 a 0.7, y de 0.7 a 0.9 alcanzando la saturación. Más específicamente, existen estudios para maderas aserradas y laminadas en función de las orientaciones de las caras en contacto [11,12], entre los que podemos mencionar trabajos previos de los autores [13,14] con valores en torno a 0.45 para el coeficiente de rozamiento estático y 0.35 para el dinámico en madera aserrada de castaño. Como investigaciones relevantes en LVL, está la realizada por Bejo et al. [15] a bajas presiones de contacto (0.5-60 kPa) en LVL de álamo amarillo entre secciones transversales (testa o canto sin especificar) friccionando contra tabla en dirección paralela y perpendicular a la fibra. Indica valores del coeficiente estático entre 0.63 y 0.37 para la dirección de tabla paralela a la fibra y entre 0.70 y 0.40 para rozamiento perpendicular a la fibra y en el caso del dinámico entre 0.29 y 0.20 para la dirección paralela a la fibra y entre 0.39 y 0.21 para rozamiento perpendicular a la fibra, en el rango de presiones estudiadas. También cabe destacar el trabajo de Dorn et al. [16] a altas presiones (hasta 30 MPa) en LVL de *Picea abies* contra acero, por lo que no resulta comparable directamente al estudio aquí realizado, aporta valores para el coeficiente estático entre 0,1 y 0,3 para superficie de acero suave y 0.8 en caso de superficie rugosa.

2. Materiales y Métodos

2.1. Material para los ensayos

Se emplearon probetas de dimensiones 100 × 40 × 25 mm^3 que se ponen en contacto entre ellas por su cara de mayor superficie y con deslizamiento en el sentido de su mayor longitud. Dado que al igual que otras propiedades, el rozamiernto depende de la humedad de la madera, las probetas fueron acondicionadas en una cámara climática, Figura 3a, para que alcancen una humedad de equilibrio del 12%, para lo cual se establece en la misma unas condiciones ambientales de 21ºC y 65% de humedad [10], comprobada inmediatamente antes de realizar los ensayos mediante higrómetro, Figura 3b, y a posteriori mediante secado en estufa. Considerando las probetas LVL-L o LVL-T, se obtienen 11 pares de rozamiento a ensayar: 1L-1L, 1T-1T, 2L-2L, 2T-2T, 3-3, 1L-2L, 1L-3, 2L-3, 1T-2T, 1T-3, 2T-3, siguiendo la siguiente nomenclatura: 1L representa los cantos LVL-L, 1T los cantos LVL-T, 2L las testas LVL-L, 2T las testas LVL-T, y 3 las tablas con disposición de fibras longitudinales. Se han realizado 15 ensayos para cada par de rozamiento.

Figura 3. (a) Parte del conjunto de probetas obtenidas para su ensayo. (b) Medición de la humedad superficial utilizando un higrómetro digital, realizada inmediatamente antes de comenzar el ensayo.

2.2. Ejecución del ensayo

Dado que no existe una normativa europea específica para la realización de ensayos de rozamiento, se ha tomado como referencia la normativa americana ASTM G-115-10 [17], que únicamente aporta recomendaciones genéricas, indicando que se ha de reproducir la realidad a estudiar lo más fielmente posible, los autores elaboraron un procedimiento de ensayo adaptando una máquina de corte directo, propia de ensayos de geotecnia, al efecto [18]. En cada ensayo se disponen en el equipo dos probetas de madera, Figura 4, de las características y dimensiones descritas en el anterior apartado sobre las que el equipo aplica un movimiento relativo horizontal para friccionar las caras en contacto, al mismo tiempo que se mide el

desplazamiento y la carga aplicada para dicho movimiento. La carga normal aplicada es de 0.625 MPa, valor similar al aplicado en otros trabajos para su aplicación a uniones estructurales [11–14]. Ésta se aplica a través de un puente de carga con una placa de reparto sobre la probeta situada en la parte superior. La velocidad en el tramo dinámico fue también similar a anteriores trabajos, de 8 mm/min lo que permite captar adecuadamente el valor del coeficiente de rozamiento dinámico en el mismo ensayo. El lector puede encontrar más detalle de la implementación de las pruebas en trabajos antes mencionados de los autores [13,14].

Figura 4. Disposición de dos probetas que constituyen un par de rozamiento en la caja del aparato de corte directo modificado en una imagen previa a la colocación de la carga vertical.

3. Resultados y Discusión

A modo de ejemplo, la siguiente figura muestra los gráficos de variación del coeficiente de rozamiento en función del desplazamiento para los ensayos realizados con los pares de rozamiento 2T-3: Testa LVL-T contra Tabla con fibra longitudinal, Figura 5.

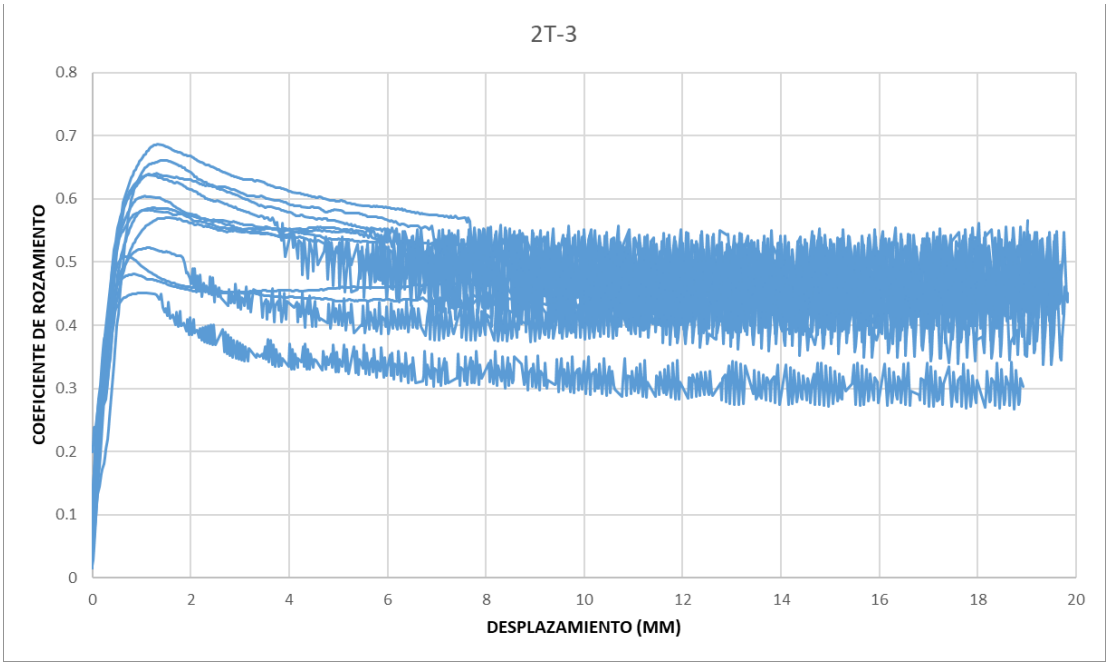


Figura 5. Relaciones entre coeficientes de rozamiento y desplazamientos del par de rozamiento 2T-3, correspondiente a Testa LVL-T contra Tabla con fibra longitudinal.

En la región estática se produce un incremento prácticamente lineal de la fuerza de fricción, hasta alcanzar un máximo valor que coincide con el "punto de desplazamiento inminente", que es aquel en el que se observa una inflexión en la gráfica, coincidiendo con el inicio del desplazamiento relativo entre las superficies en contacto. El valor máximo antes de esta inflexión corresponde al coeficiente de fricción estático μ_s. Una vez superado este máximo, se experimenta una disminución en la fuerza requerida para el deslizamiento, lo que conlleva una reducción en el valor del coeficiente de rozamiento. Se puede observar la oscilación en la representación de los valores de rozamiento en el gráfico, fenómeno conocido como stick–slip, que se da con asiduidad en el rozamiento en madera [19] y que también se ha detectado en trabajos previos de los autores, así como en otros trabajos. En estos casos la asíntota inferior de las oscilaciones se corresponde con el coeficiente dinámico, $\mu_{k,}$ como señalan en sus trabajos Fu, W. et al. y Li, L. et al. [20,21].

En la Tabla 1 se muestran los resultados numéricos obtenidos para las diferentes combinaciones de pares de rozamiento ensayados. El valor promedio global, sin tener en cuenta las orientaciones, es de 0.54 para el coeficiente de fricción estático y 0.38 para el coeficiente dinámico, lo que indica valores semejantes a los de la madera en general según lo indicado en las referencias mencionadas en el apartado 1.3 del presente trabajo. No obstante, para los pares que involucran superficies de mayor rugosidad, como testas y cantos, el valor es significativamente más alto. Los coeficientes de variación (CoV) experimentaron una ligera disminución en

comparación con la madera aserrada, lo que podría atribuirse a la mayor uniformidad de este producto en ciertas caras. La relación μ_k/μ_s alcanzó un promedio de 0.72, un valor cercano al obtenido en estudios previos realizados con madera aserrada o laminada. Resulta difícil realizar una comparativa con trabajos ya realizados para LVL por su escasez y condiciones de realización, Dorn et al. [16] realiza fricción únicamente con acero obteniendo valores de los coeficientes inferiores. Bejo et al. [15] estudia presiones de contacto apreciablemente inferiores y no en todas las posibles caras de contacto, no obstante, para pares que implican testa o cantos contra tabla longitudinal recogidos en la Tabla 1 se obtienen valores en el mismo orden de los indicados en el apartado 1.3.

Tabla 1. Promedios de los coeficientes de fricción y el coeficiente de variación (CoV) de los ensayos.

Código	Pares de rozamiento	μ_s	CoV	μ_k	CoV	μ_k/μ_s
1L-1L	CANTO-CANTO L	0.45	21.0%	0.36	18.0%	0.80
1T-1T	CANTO-CANTO T	0.48	21.6%	0.35	19.4%	0.73
1L-3	CANTO L-TABLA (long)	0.45	18.2%	0.34	20.0%	0.76
1T-3	CANTO T-TABLA (long)	0.43	22.7%	0.34	24.5%	0.79
2L-2L	TESTA-TESTA L	0.75	31.0%	0.41	9.7%	0.55
2T-2T	TESTA-TESTA T	0.85	15.3%	0.44	8.3%	0.52
2L-3	TESTA L-TABLA (long)	0.51	17.8%	0.38	16.0%	0.75
2T-3	TESTA T-TABLA (long)	0.56	13.8%	0.41	14.8%	0.73
1L-2L	CANTO-TESTA L	0.53	20.9%	0.38	19.1%	0.72
1T-2T	CANTO-TESTA T	0.54	12.4%	0.41	12.3%	0.76
3-3	TABLA-TABLA (long)	0.42	26.7%	0.33	31.9%	0.79
	VALORES MEDIOS	**0.54**		**0.38**		**0.72**

5. Conclusiones

La madera microlaminada de *Eucalyptus globulus* Labill muestra valores de los coeficientes de fricción que son coherentes con los de la madera en general, así como con los obtenidos por otros autores para este tipo de producto tecnológico de la madera elaborado con diferentes especies. No obstante, presenta valores ligeramente más altos en cuanto al rozamiento dinámico en comparación con la madera aserrada, y las diferencias son aún más notables en el caso del rozamiento estático en determinadas caras de corte. Los valores medios obtenidos globalmente, sin considerar orientaciones, fueron 0.54 para el coeficiente de rozamiento estático y 0.38 para el dinámico, si bien, para los pares que implican superficies de mayor rugosidad, fueron apreciablemente superiores. La superficie con mayor resistencia al deslizamiento y por tanto mayores coeficientes es la testa, donde se encuentran los cortes transversales a la dirección de la fibra, seguida del canto, y finalmente las superficies de tabla, que presentan los coeficientes de fricción más bajos. La madera microlaminada LVL-T muestra algunos valores de

fricción ligeramente superiores a los del LVL-L, aunque de manera tan pequeña que puede considerarse casi un comportamiento similar, siendo otros factores los que presentan mayor influencia.

6. Patentes

18. Villar García, J.R.; Vidal López, P. y; Moya Ignacio, M. Device to perform friction tests between solid bodies. Utility Model U 201932027 2020.

Financiación: Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-112954RA-I00, financiado por MCIU/AEI/10.13039/501100011033.

Agradecimientos: Los autores desean también agradecer al Grupo de Investigación Forestal y al Grupo de Investigación Ingeniería Mecánica y Fluidos el soporte logístico y administrativo para realizar este trabajo.

Conflicto de Interés: Los autores declaran que no tienen ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la presente comunicación.

References

1. Villar-García, J.R.; Crespo, J.; Moya, M.; Guaita, M. Experimental and numerical studies of the stress state at the reverse step joint in heavy timber trusses. Mater. Struct. 2018, 51, 17, doi:10.1617/s11527-018-1144-9.
2. Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Crespo, J.; Guaita, M. Analysis of the stress state at the double-step joint in heavy timber structures. Mater. Construcción 2019, 69, 196e, doi:10.3989/mc.2019.00319.
3. Aira, J.R.; Íñiguez-González, G.; Guaita, M.; Arriaga, F. Load carrying capacity of halved and tabled tenoned timber scarf joint. Mater. Struct. 2016, 49, 5343–5355, doi:10.1617/s11527-016-0864-y.
4. Koch, H.; Eisenhut, L.; Seim, W. Multi-mode failure of form-fitting timber connections – Experimental and numerical studies on the tapered tenon joint. Eng. Struct. 2013, 48, 727–738, doi:10.1016/j.engstruct.2012.12.002.
5. Pollmeier https://www.pollmeier.com/baubuche/.
6. Crespo, J.; Majano-Majano, A.; Lara-Bocanegra, A.J.; Guaita, M.(Mechanical properties of small clear specimens of Eucalyptus globulus Labill. Materials (Basel). 2020, 13, 906, doi:doi:10.1007/s40544-020-0377-0.
7. CEN EN 1995-2:2016 Eurocode 5 : Design of timber structures - Part. 2. Bridges; European Committee for Standardisation: Brussels, Belgium, 2016;
8. Argüelles, R.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Iñíguez, G.; Argüelles Bustillo, R. Timber Structures. Joints (in Spanish); AITIM. Technical Research Association of the Wood and Cork Industries: Madrid, Spain, 2015; ISBN 9788487381485.
9. Argüelles, R.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Iñíguez, G.; Argüelles Bustillo, R. Timber Structures. Basis for Calculation (in Spanish); AITIM. Technical Research Association of the Wood and Cork Industries: Madrid. Spain, 2013; ISBN 978-84-87381-44-7.
10. USDA Forest Products Laboratory Wood handbook : wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190; Madison, WI, USA, 2010;
11. Aira, J.R.; Arriaga, F.; Iniguez-Gonzalez, G.; Crespo, J. Static and kinetic friction coefficients of Scots pine (Pinus sylvestris L.), parallel and perpendicular to grain direction. Mater. Constr. 2014, 64, doi:10.3989/mc.2014.03913.
12. Crespo, J.; Regueira, R.; Soilan, A.; Díez, M.R.; Guaita, M. Methodology to determine the coefficients of both static and dynamic friction apply to different species of wood. In Proceedings of the Proceeding of the 1st Ibero-Latin American Congress on wood in construction. CIMAD 11. June 2011; Coimbra, Portugal, 2011.

13. Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Corbacho, A.J.; Moya, M. Determination of the friction coefficients of chestnut (Castanea sativa Mill.) sawn timber. Int. Agrophysics 2020, 34, 65–77, doi:10.31545/intagr/112270.
14. Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Rodríguez-Robles, D.; Moya Ignacio, M. Friction Coefficients of Chestnut (Castanea sativa Mill.) Sawn Timber for Numerical Simulation of Timber Joints. Forests 2022, 13, doi:10.3390/f13071078.
15. Bejo, L.; Lang, E.M.; Fodor, T. Friction coefficients of wood-based structural composites. For. Prod. J. 2000, 50, 39–43.
16. Dorn, M.; Habrova, K.; Koubek, R.; Serrano, E. Determination of coefficients of friction for laminated veneer lumber on steel under high pressure loads. FRICTION 2021, 9, 367–379, doi:10.1007/s40544-020-0377-0.
17. ASTM International ASTM G115-10(2018) Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients; Am. Soc. Testing Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2018;
18. Villar García, J.R.; Vidal López, P. y; Moya Ignacio, M. Device to perform friction tests between solid bodies. Utility Model U 201932027 2020.
19. Mohler, K.; Herroder, W. Range of the coefficient of friction of spruce wood rough from sawing. HOLZ ALS ROH-UND Werkst. 1979, 37, 27–32, doi:10.1007/BF02614998.
20. Fu, W.; Guan, H.; Chen, B. Investigation on the Influence of Moisture Content and Wood Section on the Frictional Properties of Beech Wood Surface. Tribol. Trans. 2021, 64, 830–840, doi:10.1080/10402004.2021.1926029.
21. Li, L.; Gong, M.; Li, D.G. Evaluation of the kinetic friction performance of modified wood decking products. Constr. Build. Mater. 2013, 40, 863–868, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.033.

Life Cycle Assessment of Mortars with Waste Addition

Andressa Campos da Silva[1], Daiane Cecchin [1,*], Afonso Rangel Garcez de Azevedo [2], Kelly Alonso Costa[1], Thelma de Barros Machado[1,3], Dirlane de Fátima Carmo[1], Flávio Castro da Silva[1]

[1] Universidade Federal Fluminense – UFF, Brasil; andressacampos@id.uff.br, daianececchin@id.uff.br, kellyalonso@id.uff.br, thelma_machado@id.uff.br, dirlanefc@id.uff.br, flaviocastro@id.uff.br

[2] Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Brasil afonso@uenf.br

[3] LAQV-REQUIMTE, Faculdade de Farmácia, Universidade do Porto, Portugal

* Correspondence: daianececchin@id.uff.br

Abstract: The construction industry is essential for rural infrastructure but consumes many natural resources and energy, causing environmental impacts. The circular economy and Life Cycle Assessment (LCA) help reduce these impacts. The present study aimed to evaluate the environmental performance of mortars containing waste through the use of LCA. Formulations with partial replacement of natural aggregate (sand) by recycled plastic (PET) and coconut fibers were analyzed, considering impacts in the categories of abiotic resource depletion, climate change, and human toxicity. The methodology followed the guidelines of NBR ISO 14040 and 14044 standards, using the cradle-to-grave approach, covering everything from raw material extraction to final disposal. The life cycle inventory was based on data from the Ecoinvent v.3.8 database, adapted to the Brazilian reality. The results indicated that Portland cement and hydrated lime are the main contributors to environmental impacts due to high energy consumption and significant CO_2 emissions. The incorporation of recyclable waste partially mitigated these impacts, with recycled PET showing higher energy consumption during processing, while coconut fibers demonstrated lower environmental impacts when used in greater proportions. Partial replacement of conventional materials with recyclable waste can significantly reduce construction environmental impacts, especially when optimizing production and transportation.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); recycled waste; mortar.

1. Introduction

The growth of industrial production on a global scale has intensified environmental impacts, particularly concerning solid waste generation in various production processes. This increase directly affects the conditions of natural habitats, making waste management an environmental and economic challenge [1]. Among the main issues associated with solid waste, whether of municipal or industrial origin, disposal stands out. The most common destination is through landfills, both

common and industrial, as permitted by Brazilian legislation. However, this approach generates high costs and raises concerns due to the continuous growth in waste volume and its potential environmental impacts [2].

A promising alternative to minimizing the environmental impacts of these wastes is their reintegration into industrial production chains. This process contributes to the transition from a linear production model to a circular economy model, adding value to previously discarded materials and transforming them into new by-products [3]. Recently, increasing environmental concerns and the demand for more sustainable development have motivated the rendering mortar sector to explore low-impact environmental solutions. These solutions aim to provide products with less polluting life cycles compared to conventional mortars, which are generally composed of cement and/or lime [4].

Life Cycle Assessment (LCA) emerges as an essential tool for quantifying the potential environmental impacts of a product or activity throughout its life cycle. This methodology allows analyzing different stages of the life cycle and enables the selection of more sustainable alternatives for products, processes, and services based on a detailed inventory of inputs and outputs of the assessed system [5,6]. In the context of construction, LCA has been progressively adopted to identify the best waste management scenarios, aiming to minimize or prevent negative impacts on ecosystems and human health [7].

LCA functions as an environmental management technique for building inventories and analyzing inputs, outputs, and potential environmental impacts of a product system throughout all its phases. It aims to understand and quantify the environmental effects associated with a product, process, or service [8]. Furthermore, it serves as an essential tool for companies seeking to integrate circularity principles into their operations, providing a comprehensive view of the product's life cycle, identifying the most significant environmental impacts, and aiding strategic decision-making.

In 2021, Carvalho, Alberto, and Silvoso conducted a bibliometric analysis of academic research related to life cycle assessment. They concluded that from 1996, when the first LCA study was conducted, to 2010, 147 documents were produced, while in 2021 alone, 179 studies were published [10]. Several studies have aimed to enable the incorporation of industrial solid waste into construction materials. Among these materials, cementitious ones have the greatest application potential due to their high added value and the environmental impacts associated with their production process. However, there remains a gap in assessing environmental impacts throughout the entire production chain of these materials, from raw

material extraction to final use. This article aims to apply the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to evaluate the environmental performance of mortars incorporating solid waste and compare them with conventional mortars.

2. Materials and Methods

LCA is divided into four stages, according to NBR ISO 14040 [8]: (1) Definition of goal, scope, and functional unit; (2) Life cycle inventory; (3) Life cycle impact assessment; (4) Interpretation.

This LCA study aims to compare different mortar mixtures with partial replacement of natural aggregate (sand) by recycled PET (in m^3).

The scope considered includes the stages of material production used in the mortar (A1-A3), transportation to the construction site (B1), mixing and mortar application (B2). The end-of-life stage (C1-C4) was also evaluated, as shown in Figure 1.

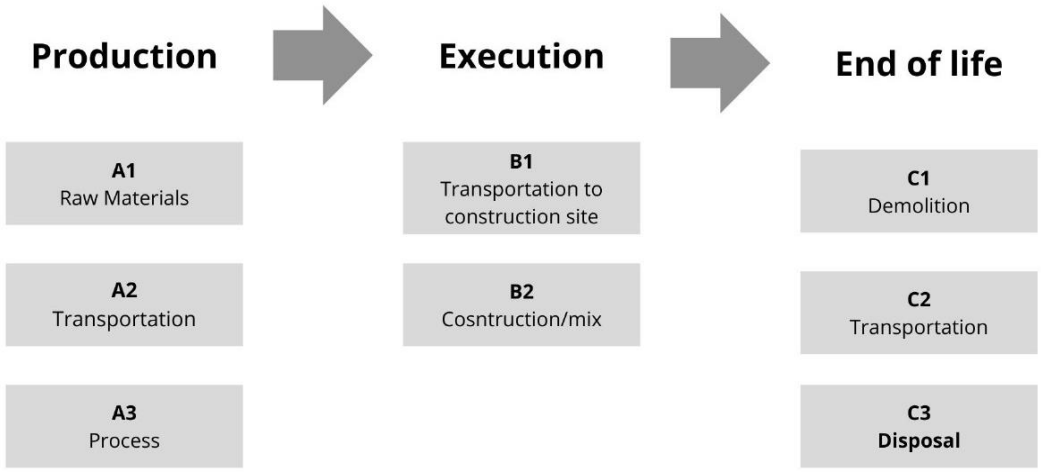


Figure 1: Scope considered in the study.

The system boundary adopted followed the cradle-to-grave approach, considering the impacts of raw material extraction, production, and transportation to the final destination for natural aggregates. For recycled aggregates, only processing and transportation were considered, disregarding the impacts associated with their previous use.

The functional unit used was 1 kg of mortar. The mix ratios of conventional mortars adopted in the study were 1:1:6 (cement: lime: sand). The mix ratios of mortars with partial replacement of natural aggregates by PET waste considered partial sand replacement at 10%, 20%, and 50%.

The study was conducted according to NBR ISO 14040 [8] and NBR ISO 14044 [9] (ABNT, 2009), as well as the recommendations of EN 15804 [10] (CEN, 2012).

For the life cycle inventory, data from the Ecoinvent v. 3.8 database was used, with adaptation to the Brazilian context for electricity consumption, transportation, and the type of cement used, as shown in Table 1. Crushed sand was used, considering extraction and crushing operations. For cement, Portland cement CP II-E32 [11] (NBR 16.697 (ABNT, 2018)) was selected. As a binder, hydrated lime [12] (NBR 7175 (ABNT, 2003)) was considered, with production and packaging stages being analyzed.

Table 1: Life Cycle Inventory Data

Activity	Dataset	Source
Crushed sand	*Sand {RoW}} gravel and quarry operation*	Ecoinvent 3.8
Cement	*Cement, Portland {BR}*	Ecoinvent 3.8
hydrated lime	*Lime, hydrated, packed {RoW}*	Ecoinvent 3.8
Coconut Fibers	*Coconut husk {GLO}|coconut husk recycled content cut-off|Cut-off, U*	Ecoinvent 3.8
Recycled plastic	*Waste polyethylene terephthalate, for recycling, sorted {RoW}*	Ecoinvent 3.8
Road Transport	*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | Cut-off, U*	Ecoinvent 3.8
Water use	*Tap water {BR}| tap water production, conventional treatment | Cut-off, U*	Ecoinvent 3.8
Energy	*Electricity, medium voltage {BR}| market group for electricity, medium voltage | Cut-off, U*	Ecoinvent 3.8
Waste disposal	*Inert waste, for final disposal {RoW}| treatment of inert waste, inert material landfil*	Ecoinvent 3.8

For all transportation stages, road transport with 10-32 ton trucks was adopted. Intermediate distance values were considered, varying depending on the inputs. Thus, for lime and cement, a distance of 50 km was adopted, and for sand, 50 km as well [13]. For recycled plastic and coconut fibers, the same distance used for final disposal in a landfill was considered.

For mortar mixing, a 400 L concrete mixer with a 2 HP motor was considered, as described by [4]. The rest of the construction work was considered manual, with no

environmental impacts to be studied. In the end-of-life stage, a transportation distance of 60 km and disposal in inert waste landfills were adopted.

The CML-IA methodology was used for assessing the environmental impacts of the life cycle, developed by the Institute of Environmental Sciences (CML) at Leiden University, Netherlands [14]. This methodology is defined as problem-oriented, where the software offers two modes, with a baseline consisting of 10 impact categories, of which three categories were used:

- Abiotic Resource Depletion: This category relates to the extraction of minerals and fossil fuels due to the consumption of raw materials in the product system. An abiotic depletion factor is calculated for each extraction of minerals (ADP) and fossil fuels (ADP-ff), measured in kg of antimony equivalent/kg of material extracted and MJ/kg of material, respectively. The geographical scope of this indicator is global.
- Climate Change: This category addresses the emissions of greenhouse gases (GHG) into the atmosphere. The characterization model developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is used to establish characterization factors. These factors are expressed as climate change potential over a 100-year horizon (GWP100), in kg of CO_2 equivalent/kg of emissions. It has a global geographical scope.
- Human Toxicity: This category concerns the effect of toxic substances on the human environment. Health risks related to occupational exposure are not included. The human toxicity potential (HTP) of each substance is expressed in kg of 1,4-dichlorobenzene equivalent/kg of emissions. The geographical scope of this indicator is local.
- Ozone Layer Depletion: This category refers to the reduction of the stratospheric ozone layer. The unit used is kg CFC-11 equivalent. CFC-11 (trichlorofluoromethane) is used as a reference substance due to its high potential for ozone layer destruction.

3. Results

Figures 2, 3, 4, and 5 present the potential environmental impacts of the different mortars evaluated (in kg).

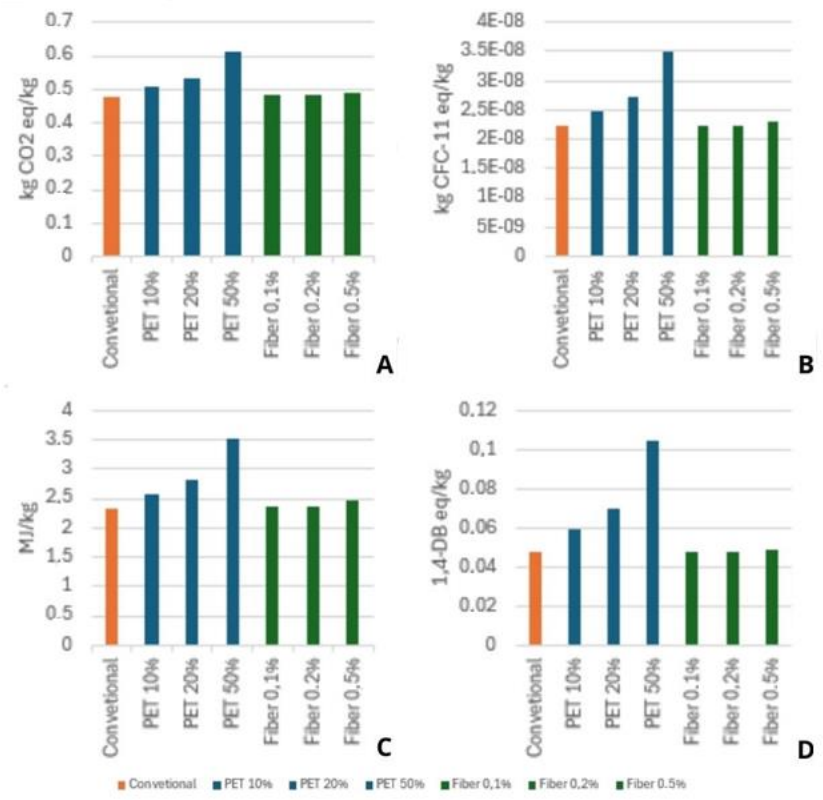


Figure 2: Comparison of the potential environmental impacts of the evaluated mortars (in kg). (A) Climate Change, (B) Ozone Layer Depletion, (C) Abiotic Resource Depletion, (D) Human Toxicity.

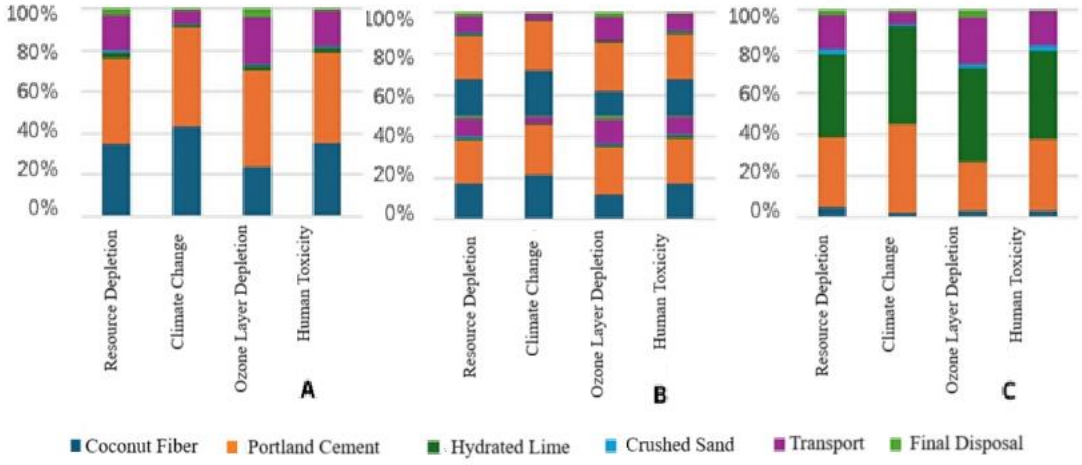


Figure 3: Mortar with Coconut Fiber. (A) Mix Ratio 0.1%, (B) Mix Ratio 0.2%, (C) Mix Ratio 0.5%.

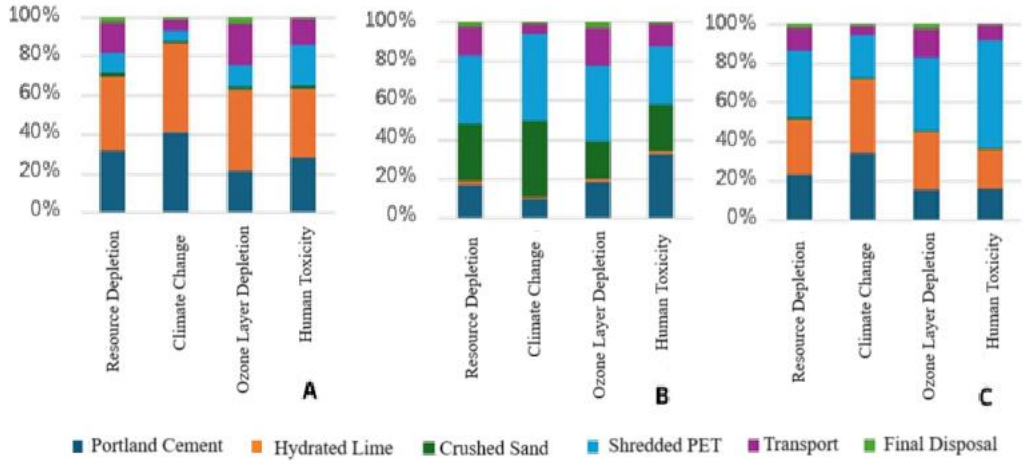


Figure 4: Mortar with PET.(A) Mix Ratio 10%, (B) Mix Ratio 20%, (C) Mix Ratio 50%.

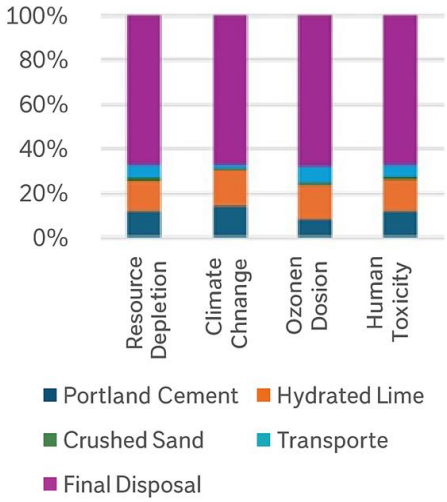


Figure 5: Conventional Mortar.

For all mortars, hydrated lime was the most impactful material due to its production not being near the usage sites, and the processes requiring high energy consumption according to the data used. Hydrated lime is a binder that improves the plasticity and workability of mortars. In masonry and rendering mortars, it increases water retention capacity, preventing separation between the mortar and masonry elements.

The second most impactful material was Portland cement, due to the high carbon dioxide emissions during its production process, making it particularly significant in the Climate Change category.

Crushed sand, although its production process results in higher diesel consumption, did not show significant relevance in the analyzed categories compared to other

materials used. The final disposal at the end of its life cycle showed similar results. Regarding transportation, considering average distances and processing performed at extraction and use areas, an average contribution was observed.

On the other hand, the processing of PET, which consumes electricity proportional to the amount used, had a more significant impact when considering the 50% replacement. The opposite was observed for coconut fibers, as the higher the amount of fiber used, the lower the allocation of impacts.

4. Discussion

The analysis of the obtained results demonstrates the environmental relevance of partially replacing conventional materials with recycled waste and natural fibers in mortar production. In particular, it is observed that mortar with treated coconut fibers shows lower environmental impacts in various categories, such as greenhouse gas emissions, human toxicity, and natural resource consumption, when compared to formulations with recycled PET. The reduction in Portland cement usage directly influences the reduction of environmental impacts in mortar production [15]. Thus, this LCA study highlights that the use of natural fibers, being renewable and requiring less processing energy, can be an interesting alternative to reduce environmental impacts in construction.

The use of recycled PET, especially in high concentrations like 50%, significantly affects categories such as climate change, energy consumption, and potential soil acidification. This finding is consistent with [16], which also found increased impacts as the amount of PET in the mixtures increased. Although advantageous in terms of reducing plastic waste in the environment, PET processing (cleaning, crushing, and preparation for use in mortars) consumes energy and inputs that increase the environmental footprint of the final product, especially when used in large quantities.

The results indicate that hydrated lime and Portland cement are the materials with the highest environmental impact in the studied mortars, mainly due to the high energy consumption in the production processes and significant carbon dioxide emissions. This observation is supported by another study, which also identified lime as one of the main causes of environmental impact in conventional mortars [17]. Other studies [18,19] have attributed the greatest contribution to environmental indicators to Portland cement, reinforcing the urgent need to seek more sustainable alternatives for these materials.

5. Conclusions

The results show that hydrated lime and Portland cement have the highest environmental impact in mortars, mainly due to high energy consumption and CO_2 emissions. Therefore, it is recommended that future research focuses on more sustainable alternatives to partially or entirely replace Portland cement and hydrated lime in mortars. Studying lower-impact materials, such as crushed sand, and solid waste like coconut fibers and PET, can be a strategy to reduce environmental impacts, especially when combined with technologies that reduce energy consumption in production and processing.

Author Contributions:. Conceptualization, Silva, A.C.; methodology, Costa, K. A.; software, Cecchin, D.; validation, Azevedo, A.R.G.; formal analysis, Silva, A.C; investigation, Silva, A.C; resources, Cecchin, D..; data curation, Silva, A.C; writing—original draft preparation, Carmo, D.F.; writing—review and editing, Machado, T.B; Cecchin, D.; visualization, Silva, F.C.; supervision, Cecchin, D.

Data Availability Statement: The data supporting the findings of this study can be made available by the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors thank the Carlos Chagas Filho Foundation for Research Support of the State of Rio de Janeiro (FAPERJ) for supporting this research through the acquisition of the SimaPro software license (E-26/211.710/2021). The corresponding author also thanks FAPERJ for the grant provided under the Programa Jovem Cientista do Nosso Estado (E-26/204.567/2024), which was essential to cover expenses and enable participation in this congress.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Oliveira, L. B., & Rosa, L. P. Brazilian Waste Potential: Energy, Environmental, Social and Economic Benefits. Energy Policy, 2003, 31,14, 1481-1491.
2. Ferreira, J. A., & Oliveira, M. P. Gestão De Resíduos Sólidos Urbanos: Desafios E Perspectivas Para A Sustentabilidade Urbana. Revista Brasileira De Gestão Urbana, 2015, 7,3, 346-359.
3. Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B.. Product Design And Business Model Strategies For A Circular Economy. Journal Of Industrial And Production Engineering, 2016, 33, 5, 308-320.
4. Caldas, L. R.; Paiva, R. De L. M.; Martins, A. P. De S.; Toledo Filho, R. D. Argamassas de terra versus convencionais: avaliação do desempenho ambiental considerando o ciclo de vida. Mix Sustentável, 2020, 6, 4, 115–128. DOI: 10.29183/2447-3073.Mix2020.V6.N4.115-128.
5. Soares, S.; Souza, D.; Pereira, S. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. Coletânea Habitare, 2006, 7, 1985, 96-127.
6. Coltro, L.; Mourad, A.; Garcia, E. E. C.; Queiroz, G. C.; Gatti, J.; Jaime, S. B. M.. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas, 2007.
7. Butera, S.; Christensen, T. H.; Astrup, T. F. Life Cycle Assessment Of Construction And Demolition Waste Management. Waste Management, Lyngby, 2015, 44, 196-205. Doi:10.1016/J.Wasman.2015.07.011
8. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. NBR 14040, Rio de Janeiro, 2009.
9. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. NBR 14044, Rio de Janeiro, 2009.
10. European Committee For Standardization. CEN EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2013.

11. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Cimento Portland – Requisitos. NBR 16697, Rio de Janeiro, 2018.
12. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Cal hidratada para argamassas - Requisitos. NBR 7175, Rio de Janeiro, 2003.
13. Caldas, L. R.; Carvalho, M. T. M.; Toledo Filho, R. D. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. Ambiente Construído, 2020, 20, 3, 343–362,
14. Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., Van Oers, L., Sleeswijk, A. W., Suh, S., De Haes, A. U. Handbook on life cycle assessment – operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, New York, 2004.
15. Souza, J. S.; Leite, M. B. Avaliação da produção e comportamento de argamassas com agregados reciclados de resíduo da construção e demolição. 2020, 6, 10, P. 79872–79887. Doi: 10.34117/Bjdv6n10-421
16. Correia, A. R. D. Avaliação do potencial de utilização de fibras de pet em materiais e soluções construtivas na indústria AEC. Dissertação de Mestrado, Universidade De Minho, Braga, Portugal, 2021.
17. Fernandes, J.; Peixoto, M.; Mateus, R.; Gervásio, H. Life Cycle Analysis Of Environmental Impacts Of Earthen Materials In The Portuguese Context: Rammed Earth And Compressed Earth Blocks, Journal Of Cleaner Production, V. 241, N.20, 82-86, 2019.
18. Carvalho, B. T.; Alberto, E.; Silvoso, M. M. Avaliação Do Ciclo De Vida (Acv) De Sistemas De Alvenaria De Blocos De Solo-Cimento Com Diferentes Dosagens. In: encontro latino-americano e europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis, 2021, 4, 250–265.
19. De Paula, R. R.; Caldas, L. R.; Paiva, R. L. M.; Toledo Filho, R. D. Avaliação do ciclo de vida de argamassas com resíduos de cerâmica vermelha considerando um indicador de desempenho mecânico durabilidade. In: Congresso Brasileiro Sobre Gestão Do Ciclo De Vida, 6., Brasília, 2018. Anais [...] Brasília: Ibict, 2018.

ANÁLISIS RESISTENTE DE VIALES DE JABRE ESTABILIZADOS CON DIFERENTES CEMENTOS

Carlos Gilarranz-Casado [1], Jorge Cervera-Gascó [2], José Alvarez-Sánchez [3], Jesús Montero-Martínez [4]

[1] UPM; carlosandres.gilarranz@upm.es
[2] UCLM; jorge.cervera@uclm.es
[3] UPM; jose.alvarez.sanchez@upm.es
[4] UCLM; jesus.montero@uclm.es

Abstract:

En el presente trabajo se ha realizado una investigación experimental sobre el comportamiento mecánico del jabre estabilizado con cuatro tipos de cemento diferentes: CEM I 42,5R, CEM II A-M (V-L) 42,5R, CEM II A-V 42,5N y CEM II B-L 32,5N. El objetivo fue evaluar la viabilidad técnica de este material como base-capa de rodadura de viales, más especializados en parques y jardines, así como determinar los parámetros óptimos de dosificación y curado para cumplir lo dispuesto en la Norma General PG-3. Se realizó una caracterización exhaustiva del jabre rojizo, abordando sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Este análisis incluyó la identificación de los componentes clave, su composición mineralógica y la evaluación de parámetros fundamentales como la humedad, la granulometría, la densidad, y la plasticidad, proporcionando una base sólida. Se analizó la resistencia a compresión simple de las mezclas de jabre-cemento, sometidas a energías de compactación del 100% del Proctor Normal y del Proctor Modificado, utilizando los cuatro tipos de cementos analizados. Se puede concluir que el jabre estabilizado con cemento presenta unas características adecuadas para su uso como material de construcción, ya que cumple con los requisitos mínimos de resistencia a compresión, densidad y estabilidad volumétrica establecidos por la normativa vigente. La humedad óptima que debe alcanzar el suelo estabilizado no varía significativamente con el tipo de cemento, siendo ésta del 10% si se compacta al 100% del PN y del 6,8% compactando al 100% del PM. La energía de compactación ejerce una influencia significativa sobre la resistencia a compresión del suelo estabilizado, mientras que el tipo de cemento, si bien presenta ciertas diferencias en los resultados, no muestra un efecto estadísticamente significativo. Para cumplir con los requisitos del PG-3, que establecen una resistencia mínima de 1,5 MPa a los 7 días de curado con una compactación al 100% del PM, si bien dicha resistencia puede alcanzarse incluso sin adición de cemento, se recomienda incorporar al menos un 1% de cemento con el fin de garantizar una adecuada cohesión entre las partículas del suelo y mejorar la estabilidad del vial.

Keywords: jabre; estabilización cemento; viales; resistencia.

1. Introducción

El jabre, por sus características geotécnicas, se ha consolidado como un material idóneo para la construcción de caminos y particularmente en viales de parques y jardines en entornos históricos y urbanos. Su uso está reconocido en actuaciones

emblemáticas como el Parque del Oeste de Madrid, así como en otros espacios singulares como Madrid Río [1], el Real Sitio de San Ildefonso o el Palacio Real de Madrid [2]. Sin embargo, su empleo tradicional sin ligante limitaba su durabilidad y resistencia mecánica, lo que motivó la exploración de su estabilización con cemento.

El objeto de este estudio es el poder caracterizar el comportamiento resistente del jabre, concretamente el del jabre rojizo, estabilizado con diferentes tipos de cemento CEM I y CEM II (con adiciones de caliza y/o cenizas volantes), bajo condiciones de compactación del Proctor Modificado a humedad óptima y con tiempos de curado de 2, 7 y 21 días. Los ensayos se diseñaron según normas UNE tomando como referencia final resistente las exigencias del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) [3].

2. Materiales y Métodos

Este estudio tuvo como objeto analizar el comportamiento mecánico de mezclas de jabre estabilizado con distintos tipos de cemento, evaluando el efecto de factores como el tipo cemento y porcentaje de este, así como el tiempo de curado.

2.1. Factores analizados:

- Tipo de cemento: se ensayaron cuatro cementos hidráulicos con distintas adiciones minerales: CEM I 42,5R (Portland), CEM II A-M (V-L) 42,5R, CEM II A-V 42,5N y CEM II B-L 32,5N.
- Porcentaje de cemento: se utilizaron concentraciones de 0 – 1,5 – 2,5 – 3,5 – 4,5 – 5,5 – 6,5 – 7,5 – 8,5 y 10 % para el PN y de 0 – 1,5 – 2,5 y 3,5% para el PM.
- Contenido de agua: se evaluó y fijó en un 10% para el PN y un 6,8% en el PM, valores previamente determinados como humedad óptima según normas UNE 103500:1994 para el PN y UNE 103501:1994 para el PM.
- Tiempo de curado: se establecieron tres periodos representativos del desarrollo de resistencia del material: 2, 7 y 21 días.
- Energía de compactación: se aplicaron dos tipos de energía, la correspondiente al ensayo PN (0,583 J/cm³) y la correspondiente al ensayo PM (2,632 J/cm³) según norma UNE-EN 13286-2:2011.

2.2. Materiales

2.2.1 Árido: jabre granítico rojo

El principal material empleado fue el jabre granítico rojo, un material granular compuesto por fragmentos de roca descompuesta procedente de la alteración de rocas graníticas, extraído de la planta de Juarros de Riomoros (Segovia). Este árido se seleccionó por su color terroso, favorable para aplicaciones paisajísticas, y por sus propiedades geotécnicas: alta fracción gruesa, no plasticidad (al tratarse de la

tercera etapa de meteorización), y buen comportamiento mecánico gracias a su alto contenido en cuarzo [4].

2.2.2. Conglomerante: cemento.

Se analizaron cuatro cementos con diferentes características fisicoquímicas, comenzando por un cemento Portland puro (CEM I 42,5R) con un 95% de clínker. Los demás cementos (CEM II) presentan adiciones como cenizas volantes silíceas y caliza en distintas proporciones, como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3. Componentes y características de los cementos utilizados

	CEM I 42,5R	**CEM II A-M (V-L) 42,5R**	**CEM II A-V 42,5N**	**CEM II B-L 32.5N**
Clínker (K)	95 %	80 %	88 %	75 %
Caliza (L)	5	9 %	-	21 %
Cenizas volantes (V)	-	11 %	12 %	-
Componentes minoritarios	5 %	4 %	3 %	5 %
Cloruros	0,01 %	0,01 %	0,01 %	0,02 %
Sulfatos	3,5 %	3,5 %	2,2 %	2,8 %
Inicio fraguado	170 min	130 min	210 min	150 min
Final fraguado	230 min	170 min	310 min	190 min
Expansión	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Resistencia a 7 días	40 MPa	42 MPa	41 MPa	31 MPa

2.2.3. Agua

Se utilizó agua potable de grifo, la cual cumple con los requisitos establecidos por el Real Decreto 140/2003 y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), garantizando la ausencia de elementos que puedan interferir negativamente en las reacciones de hidratación del cemento.

2.3. Metodología

2.3.1. Preparación de muestras

Las muestras de jabre fueron recibidas, secadas al aire, desmenuzadas con mazo de goma y cuarteadas para obtener porciones representativas. Posteriormente, se tamizaron y almacenaron según [5] para asegurar su homogeneidad y representatividad.

2.3.2. Caracterización del material

Se realizaron ensayos de caracterización básica del jabre:

- Composición elemental por fluorescencia de Rayos X [6].
- Composición mineralógica mediante difracción de rayos X [7].
- Análisis granulométrico por tamizado [8].

- Límite líquido y límite plástico [9][10].

2.3.3. Compactación PN y PM

Las mezclas de jabre y cemento fueron preparadas añadiendo el agua correspondiente hasta alcanzar la humedad óptima. A continuación, se vertieron en moldes de 102 mm de diámetro y 122,4 mm de altura para el PN, y en moldes de 152 mm de diámetro y 127 mm de altura para el PM. La compactación se realizó conforme a la normativa UNE: en el caso del PN, en tres tongadas de 26 golpes cada una con una maza de 2,5 kg dejada caer desde 305 mm de altura [11]; y para el PM, en cinco capas de 60 golpes cada una con una maza de 4,535 kg desde una altura de 457 mm [12].

Esta metodología caracteriza la humedad óptima a la cual se da la máxima densidad, adecuada para simular condiciones de obra vial o de estructuras con requerimientos mecánicos exigentes.

2.3.4. Ensayo de resistencia a compresión

La resistencia a compresión simple se determinó conforme a [13]. Las probetas cilíndricas fueron sometidas a carga axial en prensa hidráulica de 2000 kN, registrando la carga máxima soportada y calculando la tensión de rotura en MPa.

2.3.5. Análisis estadístico

En este estudio se emplearon herramientas estadísticas para analizar la resistencia a compresión del jabre estabilizado con distintos cementos. Se inició con un análisis descriptivo para identificar tendencias según el porcentaje de cemento. Posteriormente, se aplicaron modelos de regresión cuadrática para los ensayos PN y PM, evaluando su ajuste mediante R^2 y RMSE. La validez del modelo predictivo se comprobó mediante un ANOVA múltiple, considerando el tipo de cemento y el tiempo de curado, y verificando los supuestos de independencia (Durbin-Watson), normalidad (Jarque-Bera) y homocedasticidad (Goldfeld-Quandt). Finalmente, se utilizaron pruebas de Tukey para comparar resistencias entre cementos y tiempos de curado, identificando diferencias significativas en el comportamiento resistente.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del material

3.1.1. Composición mineralógica y química

El jabre granítico rojizo analizado presenta una mineralogía dominada por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y filosilicatos (específicamente esmectita, mica y

kandita), como así también aprecia Montes (2004) [14]. Esta composición proporciona una buena estabilidad estructural, baja plasticidad y propiedades adecuadas para la estabilización con conglomerantes.

Los análisis realizados en el IGME-CSIC de FRX revelan un alto contenido en dióxido de silicio (72,7%), seguido de alúmina (13,5%) y óxido potásico (5,85%), entre otros elementos mayoritarios. Este perfil químico coincide con las observaciones de Montes (2004) en su estudio sobre capas estructurales en una vía romana, destacando la importancia del cuarzo (SiO_2) y tal como indica la Figura 1.

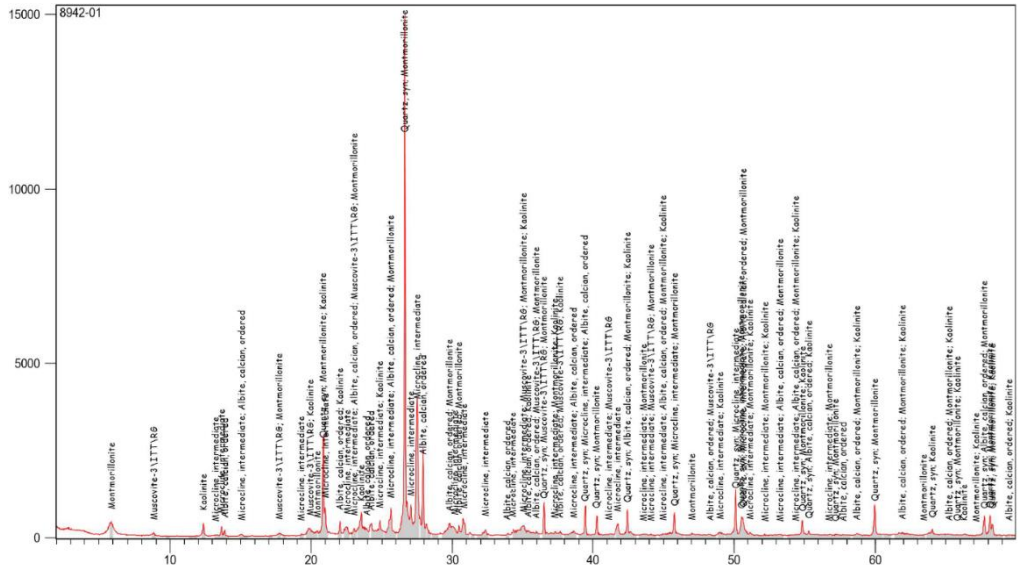
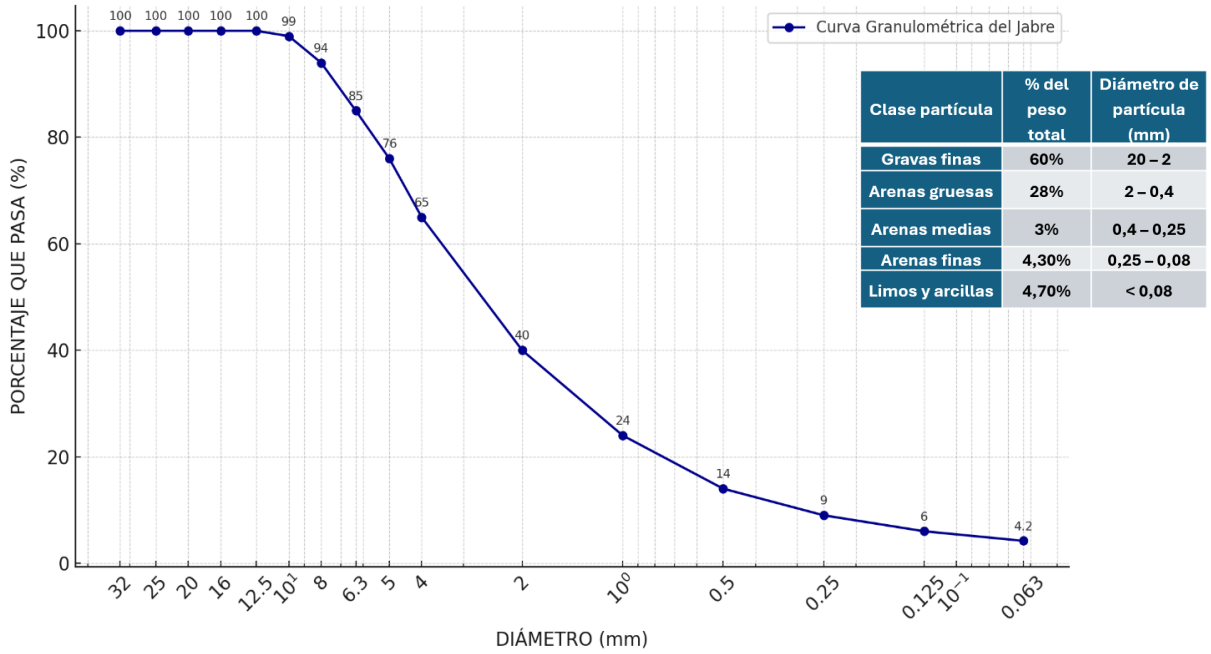


Figura 1. Difactograma de polvo total del jabre.

3.1.2. Granulometría

Los resultados obtenidos muestran que se trata de un suelo con una granulometría continua y bien graduada, compuesto principalmente por gravas finas (60%) y arenas gruesas (28%), con un contenido muy reducido de finos (limos y arcillas) que apenas alcanza el 4,7%, tal como muestra la Figura 2. Este reparto hace que el jabre se comporte como un árido suelto de baja plasticidad, ideal para su estabilización con conglomerantes como el cemento.



Clase partícula	% del peso total	Diámetro de partícula (mm)
Gravas finas	60%	20 – 2
Arenas gruesas	28%	2 – 0,4
Arenas medias	3%	0,4 – 0,25
Arenas finas	4,30%	0,25 – 0,08
Limos y arcillas	4,70%	< 0,08

Figura 2. Curva granulométrica del jabre.

Desde el punto de vista normativo, el jabre cumple con los criterios granulométricos establecidos para suelos seleccionados y estabilizados con cemento según el PG-3. Sin embargo, debido a su bajo contenido en finos (<5%), no es apto para estabilización con cal, siendo su clasificación más adecuada la de suelo tipo S-EST3, debiendo cumplir un valor de resistencia mínima a compresión simple a los 7 días de 1,5 MPa.

Esta granulometría del jabre rojizo lo convierte en un material técnicamente apto para su uso en firmes estabilizados y capas de base en infraestructuras viarias, con un excelente comportamiento mecánico siempre que se garantice una adecuada compactación y dosificación de cemento.

3.1.3. Plasticidad del jabre

Los ensayos de plasticidad realizados al jabre rojizo indican la ausencia total de comportamiento plástico: tanto el límite líquido como el límite plástico son nulos, sin posibilidad de determinar valores mediante los métodos de Atterberg, lo que da como resultado un índice de plasticidad (IP) igual a cero. Esta característica, asociada a una mínima presencia de arcillas expansivas, es favorable geotécnicamente para su uso en firmes, ya que mejora la estabilidad frente a la humedad. Este resultado es coherente con su granulometría, dominada por gravas y arenas gruesas con menos de un 5% de finos, lo que lo clasifica como un árido no cohesivo. Aunque carece de cohesión natural, puede adquirirla mediante estabilización con cemento, lo que lo hace idóneo para firmes estabilizados.

Además, los resultados se alinean con estudios previos de Teijón et al., 2020 y Gómez, 2021, [15][16]que también identificaron jabres con IP nulo como materiales aptos para estabilización. En ese sentido, la incorporación de cemento no solo mejora la cohesión, sino que también reduce aún más la plasticidad residual, optimizando el rendimiento del suelo tratado en obra.

3.1.4. Clasificación del suelo

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio permiten clasificar el jabre rojizo con criterios claros dentro de las principales normativas de caracterización de suelos.

- Clasificación SUCS (Unified Soil Classification System):
  Según la curva granulométrica y el índice de plasticidad nulo, el jabre se clasifica como un suelo granular sin cohesión, concretamente dentro del grupo GW (Gravel Well-graded) considerando mayoritaria la fracción gruesa. Los valores del Coeficiente de Uniformidad (Cu = 12) y del Coeficiente de Curvatura (Cc = 1,75) indican una distribución granulométrica bien graduada, lo que confirma su excelente comportamiento mecánico y su idoneidad para compactación.
- Clasificación AASHTO:
  En función del porcentaje de finos que pasa por el tamiz nº 200 (<15%) y del índice de grupo calculado (IG = 0), el jabre se clasifica dentro del grupo A-1-a, reservado para materiales granulares de la más alta calidad para obras viales. Esta categoría incluye mezclas de gravas y arenas con mínima presencia de finos no plásticos, lo que refuerza su utilización como material de base y subbase con excelente rendimiento tanto en condiciones secas como húmedas.
- Clasificación PG-3:
  De acuerdo con la Orden FOM/2523/2014 y los requisitos establecidos en el PG-3, el jabre cumple con los criterios para ser clasificado como un suelo seleccionado estabilizable con cemento. A pesar de que no alcanza el porcentaje mínimo de finos necesario para su estabilización con cal, sí cumple con las condiciones granulométricas y de plasticidad exigidas para los suelos del tipo S-EST3, caracterizados por un índice plástico inferior al 15%. Además, este tipo de suelo debe alcanzar una resistencia a compresión simple mínima de 1,5 MPa a los 7 días, valor asumido como referencia para su comportamiento estructural en estabilización in situ.

3.1.5. Determinación de la humedad óptima y densidad seca máxima en PM

Se determinaron las humedades óptimas para mezclas de jabre y cuatro tipos de cemento mediante el ensayo PM [12]. Los valores medios obtenidos fueron muy similares entre los cementos, con diferencias inferiores a 0,5 puntos porcentuales, tal como se muestra en la Tabla 4 y

Tabla **5**.

Tabla 4. Valores de humedades óptimas y densidades secas en PN.

CEM I 42,5R			CEM II A-M (V-L) 42,5R			CEM II A-V 42,5N			CEM II B-L 32.5N		
Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)	Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)	Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)	Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)
0,00	9,76	1,893	0,00	9,74	1,895	0,00	9,72	1,897	0,00	9,70	1,890
1,50	9,92	1,903	1,50	9,89	1,905	1,50	9,87	1,908	1,50	9,81	1,901
2,50	10,00	1,923	2,50	9,94	1,925	2,50	9,92	1,928	2,50	9,87	1,921
3,50	10,08	1,953	3,50	10,01	1,956	3,50	9,97	1,958	3,50	9,93	1,950
4,50	10,11	1,963	4,50	10,04	1,969	4,50	10,00	1,970	4,50	9,98	1,961
5,50	10,17	1,968	5,50	10,12	1,976	5,50	10,07	1,976	5,50	10,01	1,965
6,50	10,21	1,974	6,50	10,17	1,978	6,50	10,13	1,979	6,50	10,06	1,969
7,50	10,23	1,974	7,50	10,18	1,981	7,50	10,15	1,981	7,50	10,09	1,971
8,50	10,28	1,978	8,50	10,21	1,984	8,50	10,18	1,984	8,50	10,13	1,975
10,00	10,30	1,983	10,00	10,24	1,987	10,00	10,20	1,987	10,00	10,15	1,981
Media	**10,11**	**1,951**	**Media**	**10,05**	**1,956**	**Media**	**10,02**	**1,957**	**Media**	**9,97**	**1,948**

Tabla 5. Valores de humedades óptimas y densidades secas en PM.

CEM I 42,5R			CEM II A-M (V-L) 42,5R			CEM II A-V 42,5N			CEM II B-L 32.5N		
Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)	Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)	Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)	Cemento (%)	H. óptima (%)	Densidad (kg/dm3)
0,00	6,66	2,088	0,00	6,65	2,091	0,00	6,63	2,094	0,00	6,61	2,078
1,50	6,78	2,141	1,50	6,75	2,156	1,50	6,73	2,152	1,50	6,72	2,133
2,50	6,97	2,159	2,50	6,94	2,176	2,50	6,91	2,170	2,50	6,85	2,148
3,50	6,99	2,165	3,50	6,97	2,183	3,50	6,94	2,175	3,50	6,89	2,159
Media	**6,85**	**2,138**	**Media**	**6,83**	**2,152**	**Media**	**6,80**	**2,148**	**Media**	**6,77**	**2,130**

Esta estabilidad entre tipos de cemento está en línea con estudios previos como los de la Portland Cement Association (1956) [17] en su libro *Soil-cement handbook* y del IECA (2008) en su libro de *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal* [18], que indican que, en suelos arenosos, como el jabre, las variaciones en la humedad óptima son poco significativas.

El análisis ANOVA mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas en la humedad óptima entre los cuatro tipos de cemento ($p > 0,63$), lo que indica que el tipo de conglomerante no influye de forma relevante en este parámetro del jabre estabilizado. De forma análoga, se estudió la densidad seca máxima correspondiente a dicha humedad óptima, obteniéndose también resultados no significativos: el tipo de cemento no afecta significativamente a la densidad seca máxima. Aunque se observan ligeros incrementos en ambos valores al añadir cemento —debido a su afinidad por el agua—, las diferencias entre tipos son

mínimas. En conjunto, esto permite elegir el tipo de cemento en función de criterios técnicos, económicos o ambientales, sin necesidad de modificar las condiciones de compactación del suelo.3.1.6. Resistencia a compresión simple en probetas compactadas al 100% del PN

El estudio de la resistencia a compresión simple del jabre estabilizado con cemento se ha llevado a cabo sobre probetas compactadas al 100% del Proctor Normal, utilizando los cuatro tipos de cemento y evaluando su comportamiento a 2, 7 y 21 días de curado, tomando como humedad óptima la del PN 10%.

Se han realizado las curvas de regresión que determinan las evoluciones resistentes para los cuatro tipos de cemento (CEM I 42,5R, CEM II A-M (V-L) 42,5R, CEM II A-V 42,5N y CEM II B-L 32,5N) en diferentes dosificaciones (0–10%) a 2, 7 y 21 días de curado, comparando sus resultados con el umbral mínimo de 1,5 MPa establecido por la normativa PG-3 para capas estabilizadas tal y como indica la Figura 4.

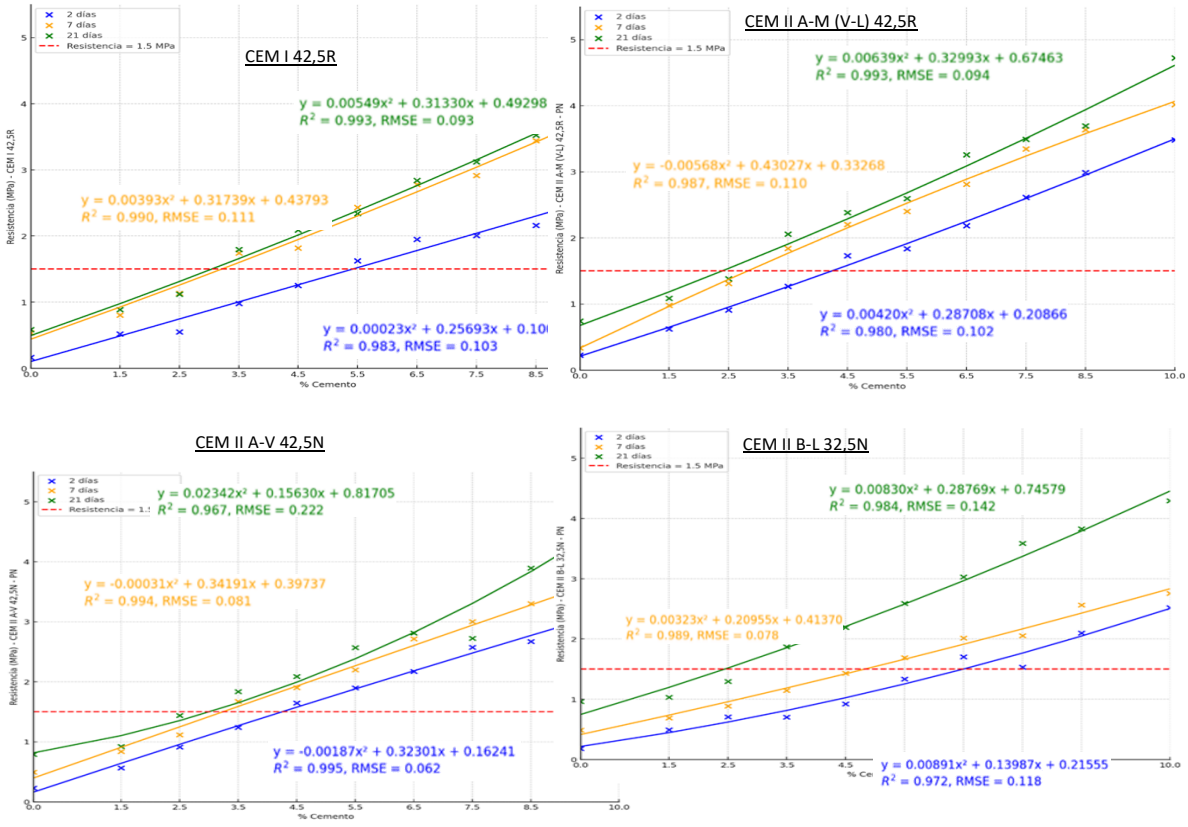


Figura 3. Evoluciones resistentes del jabre estabilizado al PN con los 4 tipos de cemento. Modelos de regresión cuadrática.

3.1.6. Resistencia a compresión simple en probetas compactadas al 100% del PM

Con el objeto de valorar el efecto de una mayor energía de compactación, se ha analizado la resistencia a compresión simple de las probetas compactadas al 100% del PM, empleando una humedad óptima del 6,8%. El estudio se ha desarrollado a lo largo de 2, 7 y 21 días de curado, considerando distintas dosificaciones de cemento entre el 0% y el 3,5%.

A partir de los resultados obtenidos, se han ajustado modelos de regresión para cada uno de los cuatro cementos empleados, lo que ha permitido representar de forma precisa la evolución resistente y contrastarla con el umbral normativo mínimo de 1,5 MPa establecido por el PG-3. Estos modelos permiten visualizar y comparar de forma clara el comportamiento mecánico del material bajo condiciones de mayor densificación, tal y como se refleja en la Figura 4.

Los resultados indican una evolución creciente de la resistencia con el contenido de cemento y el tiempo de curado, aunque con diferencias según el tipo de cemento:

- CEM I 42,5R mostró el mejor rendimiento global, alcanzando resistencias cercanas a 3,5 MPa con el 3,5% de cemento a los 21 días.
- CEM II A-M (V-L) 42,5R, con adiciones de caliza y cenizas volantes, mostró un comportamiento intermedio, alcanzando algo más de 2,5 MPa con un 3,5% de cemento a 7 días, con buena evolución a 21 días.
- CEM II A-V 42,5N, con solo cenizas volantes, presentó menor ganancia de resistencia a largo plazo y los incrementos de resistencia debidos al aumento del porcentaje de cemento no fueron nada significativos.
- CEM II B-L 32,5N, el de menor resistencia característica, es el que ofreció el rendimiento resistente más bajo.

Es de destacar que en el PM, en los cuatro cementos se ha superado el umbral mínimo incluso sin adición de cemento a partir de los 7 días, bien debido a los componentes propios intrínsecos del jabre, como puedan ser los compuestos alumínicos y tambien debido a ese porcentaje de arcillas, que aunque bajo, hace que se produzcan una serie de reacciones puzolánicas naturales en presencia de humedad, favoreciendo la ganancia de resistencia con el tiempo. Estas reacciones, combinadas con una compactación eficiente al 100% del Proctor Modificado, generan una estructura interna más densa y estable, lo que contribuye a que el material adquiera cohesión incluso en ausencia de conglomerantes.

CEM I 42,5R CEM II A-M (V-L) 42,5R

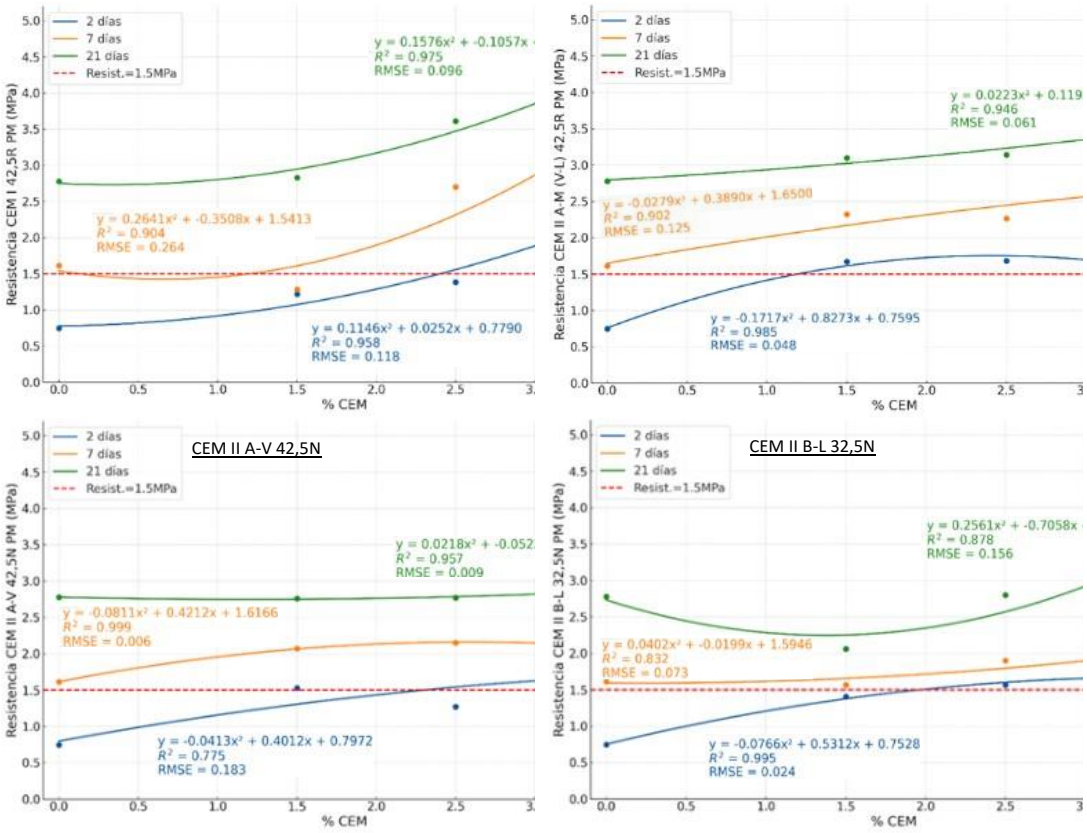


Figura 4. Evoluciones resistentes del jabre estabilizado al PM con los 4 tipos de cemento. Modelos de regresión cuadrática.

En conjunto, el estudio demuestra que el jabre, aun sin adición de conglomerantes, puede alcanzar resistencias estructurales aceptables. No obstante, la adición de un mínimo del 1% de cemento es recomendable para garantizar cohesión y durabilidad, especialmente en firmes sometidos a cargas repetitivas o ambientes húmedos.

3.1.8. Análisis ANOVA de los valores de resistencia, PN y PM

Se ha realizado un análisis de varianza para evaluar el efecto de tres factores (tipo de cemento, porcentaje de cemento añadido y días de curado) sobre la resistencia a compresión del jabre estabilizado, compactado al 100% del PN con una humedad óptima del 10% y otro para el ensayo PM con humedad óptima del 6,8%, validando ambos ensayos, aunque nos centramos sobre el ensayo PM ya que es el que nos indica como requerimiento el PG-3; que se alcance una resistencia mínima de 1,5 MPa a los siete días de curado con una energía de compactación referida al PM.

Tal y como muestra la Tabla 6 los resultados del ANOVA muestran que los días de curado ($p < 0,001$) y el tipo de cemento ($p < 0,001$) tienen un efecto altamente significativo en la resistencia.

El modelo cumplió con los supuestos de independencia (Durbin-Watson ≈ 2), normalidad de los residuos (prueba de Jarque-Bera: p > 0,05) y homocedasticidad (Goldfeld-Quandt: p > 0,05), confirmándose así la validez del modelo estadístico aplicado, más aún si son eliminados los cuatro valores más erráticos.

Las predicciones muestran que todos los cementos alcanzan la resistencia mínima exigida de 1,5 MPa a los 7 días incluso sin adición de cemento, aunque se recomienda aportar al menos un 1% de CEM para garantizar cohesión interna.

Tabla 6. ANOVA valores de resistencia para el Proctor Modificado

Fuente	Σ cuadrados	Grados de libertad	Estadístico F	P-valor
Días de curado	42,838	2	216,931	< 0,0001
Tipo de cemento	2,486	3	8,393	< 0,0001
Días de curado: Tipo de cemento	0,961	6	1,622	0,153
Porcentaje de cemento	0,215	1	2,182	0,144
Días de curado: Porcentaje de cemento	0,948	2	4,802	0,011
Tipo de cemento: Porcentaje de cemento	2,567	3	8,667	< 0,0001
(Porcentaje de cemento)²	0,292	1	2,957	0,09
Días de curado: (Porcentaje de cemento)²	0,775	2	3,923	0,024
Residual	7,405	75	-	-

El test de Tukey confirmó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de cemento (p > 0,05), pero sí entre los distintos tiempos de curado (p < 0,00001 en todos los pares), lo que evidencia que la resistencia aumenta significativamente con el tiempo de curado, especialmente entre 7 y 21 días.

3.1.9. Comparativa de resistencias entre compactaciones PN y PM

Se llevó a cabo un análisis ANOVA considerando como factores el tipo de cemento, el tiempo de curado y la energía de compactación (PN vs PM), utilizando únicamente los porcentajes de cemento comunes (0–3,5%). Los resultados revelaron que la energía de compactación tiene un efecto altamente significativo sobre la resistencia a compresión (p < 0,0001), tal y como muestra la Tabla 7.

Tabla 7. ANOVA comparativa del PN y PM en función de la energía de compactación

Fuente	Σ cuadrados	Grados de libertad	Estadístico F	P-valor
Energía de Compactación	67,97	1,00	290,19	< 0,0001
Tiempo_Curado	39,67	2,00	84,67	< 0,0001
Tipo_Cemento	1,83	3,00	2,61	0,05
Energía Compactación: Tiempo de Curado	8,94	2,00	19,09	< 0,0001
Energía de Compactacion: Tipo de Cemento	1,23	3,00	1,75	0,16
Tiempo de Curado: Tipo de Cemento	0,65	6,00	0,46	0,84
Residual	0,78	6,00	-	-

La prueba de Tukey verificó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre PN y PM, siendo la resistencia media obtenida con PM más del doble que la alcanzada con PN. En concreto, las medias de resistencia fueron: PM → 2,15 MPa y PN→ 0,96 MPa. Esto implica una proporción de mejora aproximada de 2,25 veces al aplicar una compactación más elevada.

4. Conclusiones

- El jabre rojizo es un material granular con excelente granulometría, idóneo para estabilización con cemento.
- La humedad óptima está entorno al 10% en el PN y al 6,8% en el PM, no variando significativamente con el tipo de cemento tras la compactación del suelo estabilizado.
- No hay diferencias estadísticamente significativas en resistencia entre los tipos de cemento estudiados en igualdad de condiciones.
- El tiempo de curado influye: mayor aumento de resistencia entre los días 2 y 7 en el PN y entre 7 y 21 días en el PM.
- El Proctor Modificado mejora significativamente la resistencia, con una relación de 2,25 veces más resistencia que el PN.
- Para alcanzar resistencias de 1,5 MPa a 7 días de curado:
  - PN requiere entre 2,8-4,8% de cemento según el tipo.
  - PM puede cumplir sin adición de cemento, debido a la composición y a la granulometría del jabre. Recomendación del 1% de cemento.
- Además de validar el uso del jabre estabilizado para caminos y viales de parques y jardines, los resultados permiten establecer recomendaciones técnicas para optimizar la mezcla con una correcta elección del tipo de

cemento, asegurando durabilidad, resistencia y sostenibilidad en estos entornos.

- En conclusión, la estabilización del jabre con cemento no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también permite su consolidación como alternativa técnica viable, respetuosa con el paisaje y adecuada para la rehabilitación y construcción de caminos en jardines históricos y espacios públicos urbanos.

Referencias

1. Ayuntamiento de Madrid. (2011). Pliego de condiciones técnicas particulares para la conservación y el mantenimiento integral del parque de Madrid Río.
2. Patrimonio Nacional. (2023a). Memoria de actividades de Patrimonio Nacional.
3. Orden FOM/2523/2014, Orden Ministerial. (2014).
4. Alejano, L. R., Pérez-Rey, I., Estévez-Ventosa, X., Muñiz-Menéndez, M., & Arzúa, J. (2021a). Fenómenos de inestabilidad natural en macizos rocosos graníticos: Laderas en jabre, campos de bolos y bolos irregulares de granito. Boletín Geológico y Minero, 132(4), 363–374.
5. UNE 103101. (1995). Análisis granulométrico de suelos por tamizado. AENOR.
6. UNE-EN 15309. (2008). Caracterización de residuos y suelo. Determinación de la composición elemental por fluorescencia de rayos X. AENOR.
7. UNE-EN 13925. (2006). Ensayos no destructivos. Difracción de rayos X aplicada a materiales policristalinos y amorfos. AENOR.
8. UNE EN 933-1. (2012). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. AENOR.
9. UNE-EN ISO 17892-12. (2019a). Determinación del límite líquido del suelo por el método del aparato de Casagrande. AENOR.
10. UNE-EN ISO 17892-12. (2019b). Determinación del límite plástico del suelo. AENOR.
11. UNE 103500. (1994). Ensayo de compactación Proctor Normal. AENOR
12. UNE 103501. (1994). Ensayo de compactación Proctor Modificado. AENOR.
13. UNE-EN 13286-41. (2022). Determinación de la resistencia a compresión de mezclas de áridos con conglomerante hidráulico. AENOR.
14. Montes, J. G. (2004). Identificación de una carretera romana a través de la procedencia de los materiales. Paper presented at the Elementos de Ingeniería Romana. Congreso Europeo Obras Públicas Romanas, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas. Tarragona.
15. Teijón-López-Zuazo, E., Vega Zamanillo, A., Calzada Pérez, M. Á., & Juli Gándara, L. (2020). Estimation of unconfined compressive strength of cement-stabilized jabre as material upgrade on highway construction.
16. Gómez, J. E. (2021). En TFM (Ed.), Análisis resistente de vías con capas de rodadura de jabre estabilizados con cemento. (UCLM ed.)
17. Portland Cement Association. (1956). Soil-Cement Construction Handbook. Recuperado de https://archive.org/details/SoilCementConstructionHandbook/page/n99/mode/2up
18. IECA. (2008). Manual de estabilización de suelos estabilización de suelos con cemento o cal. IECA. S.B.N.: 978-84-89702-23-3.

Determinación de las propiedades mecánicas de pellets de plástico

Manuel Moya [1,*], José Ángel Romero [2] and José Ramón Villar [3]

[1] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia (Cáceres), España; manuelmi@unex.es

[2] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia (Cáceres), España; romerolopezjangel@gmail.com

[3] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia (Cáceres), España; jrvillar@unex.es

* Correspondence: manuelmi@unex.es; Tel.: +34-927427000 Ext. 52118

Abstract: Los pellets de plástico son gránulos que se emplean en una gran diversidad de procesos industriales, muchos de ellos relacionados directamente con industrias del sector agrícola. Su reutilización es esencial para minimizar el impacto ambiental negativo que puede ocasionar este material en el entorno natural. Dado que su empleo a nivel industrial requiere de enormes cantidades, es necesario utilizar silos agrícolas que faciliten su almacenamiento. Por ello, el objetivo de este trabajo es aportar datos de algunas de las propiedades mecánicas que se precisan conocer para determinar las presiones que ejerce este material cuando se almacena en el interior de un silo agrícola. Las propiedades determinadas en el presente trabajo han sido el ángulo de rozamiento interno, la cohesión aparente, el ángulo de dilatancia, el coeficiente de rozamiento con chapa metálica lisa, el módulo edométrico y la densidad aparente del material. Para ello, se han llevado a cabo ensayos de corte directo, de determinación del peso específico aparente y edométricos. Los resultados extraídos podrán ser utilizados en estudios posteriores en los que se generen modelos de elementos discretos con los que se puedan determinar las cargas generadas en condiciones estáticas y dinámicas.

Keywords: Silo; ángulo de rozamiento interno; peso específico aparente; corte directo; edómetro; cohesión; módulo de elasticidad.

1. Introducción

Los plásticos son materiales económicos, ligeros y con una gran vida útil, que pueden moldearse fácilmente para ser utilizados de múltiples maneras con distintos tipos de productos, lo que ha motivado que su producción se haya incrementado sensiblemente en las últimas décadas[1,2]. La mayor parte del plástico producido se destina a la fabricación de envases u otro tipo de productos de corta vida útil pues se suelen consumir en un período de tiempo inferior al año [1], lo cual no es sostenible y hace necesario su reciclaje. Dado que el plástico es un polímero que puede adquirir distintos tipos de formas y en los que puede variar su composición, existe una gran variedad de ellos, por lo que sus usos pueden variar,

aplicándose en distintos tipos de industrias, como la de automoción, la de los electrodomésticos, la de juguetes las agroalimentarias, etc., en las que en muchos casos se emplean para reemplazar el uso de metales[2]. Por esta razón, gran parte de los parámetros que se utilizan para determinar las propiedades mecánicas de los metales se pueden aplicar también para la caracterización mecánica de los plásticos, tales como el módulo de elasticidad, el límite elástico y la resistencia a tracción [2]. A raíz de los estudios llevados a cabo con este tipo de material, las características resistentes de los plásticos vírgenes son mejores que las de los plásticos reciclados [2]. Por este motivo, ya se han publicado algunos trabajos en los que se están analizando las propiedades mecánicas de diferentes plásticos reciclados con el fin de mejorar sus prestaciones [2–5].

Los pellets de plástico, que reciben habitualmente el nombre de granza, deben almacenarse en lugares en los que se garantice un ambiente seco, limpio y bien ventilado para mantener intactas sus propiedades, evitando exposiciones prolongadas al sol y a altas temperaturas. Por este motivo, las industrias que fabrican este tipo de productos recurren habitualmente al empleo de silos para su almacenamiento. Por ello, aunque las propiedades que deben poseer estos materiales para los usos que se les pueda dar posteriormente son conocidas [6], las cargas que se generan en el interior de los silos dependen de los mismos parámetros que se han determinado en numerosos trabajos con diversos materiales agroforestales [7–10].

A tenor de lo expuesto en los párrafos anteriores, el objetivo de este trabajo es proporcionar los valores de algunos de los parámetros que se precisan conocer para determinar las cargas que ejercen los pellets de plástico cuando se almacenan en el interior de silos agrícolas.

2. Materiales y Métodos

El pellet de plástico utilizado en este trabajo es granza de PET, el cual se utiliza para la fabricación de botellas. Este material ha sido suministrado por la empresa SSolís, ubicada en Alcorcón (Madrid). Los ensayos realizados se han llevado a cabo en el laboratorio de geotecnia del Centro Universitario de Plasencia, perteneciente a la Universidad de Extremadura.

Las propiedades del material determinadas en este trabajo fueron el ángulo de rozamiento interno, la cohesión aparente, el ángulo de dilatancia, el ángulo de rozamiento con chapa lisa, el peso específico aparente y el módulo edométrico del material. A continuación, se realiza una descripción de los ensayos llevados a cabo para tal fin.

2.1. Ensayos de corte directo

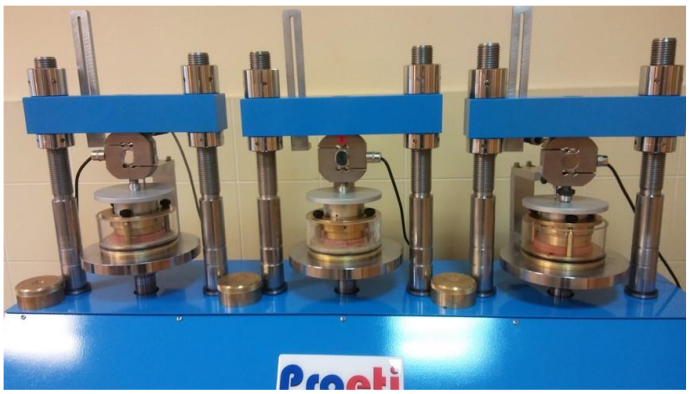
Los ensayos de corte directo se han realizado siguiendo las especificaciones de la parte 10 de la norma UNE-EN-ISO 17892 [11], ensayos similares a los llevados a cabo por los autores con anterioridad utilizando otros materiales [8,12]. Las propiedades determinadas con este ensayo fueron el ángulo de rozamiento interno, la cohesión aparente, el ángulo de dilatancia y el coeficiente de rozamiento con chapa lisa. Para ello, el laboratorio de geotecnia dispone de un aparato de corte directo semiautomático, el cual se muestra en la figura 1:

Figura 1. Aparato de corte directo utilizado en este trabajo.

Los ensayos se realizaron utilizando una caja de corte circular de 10 cm de diámetro. En ellos se seleccionó una velocidad de corte de 0,63 mm/min y se aplicaron

tensiones normales de 12,5; 25; 37,4; 62,4; 124,8; 249,6 y 374 kPa. Cada una de las tensiones normales aplicadas fue repetida un mínimo de tres veces con el fin de poder obtener resultados fiables. El software del que está dotado el equipo posibilitó la descarga de los resultados obtenidos, permitiendo exportar éstos como ficheros Excel, de modo que su posterior tratamiento permitió obtener los distintos valores y gráficos que se mostrarán en el apartado de resultados.

Para la realización de los ensayos de rozamiento del material con chapa lisa se modificó la semicaja de corte inferior y se colocó una chapa lisa, rellenando de



granza únicamente la semicaja superior, procediendo a ejecutar los ensayos en las mismas condiciones que se han comentado en el párrafo anterior. La figura 2 muestra una imagen de la modificación de la semicaja inferior de corte.

Figura 2. Semicaja inferior de corte modificada para la realización de los ensayos de rozamiento del material.

2.2. Ensayos edométricos

El laboratorio de geotecnia dispone de una bancada de tres edómetros automáticos, los cuales se muestran en la figura 3, con los cuales se determinó el módulo edométrico del material. A partir de este parámetro y conociendo el coeficiente de Poisson, se puede determinar el módulo de elasticidad. No obstante, dado que en el momento de la presentación del presente trabajo no se habían podido ejecutar los correspondientes ensayos triaxiales con los que determinar el coeficiente de Poisson, no será posible facilitar datos del módulo de elasticidad del material como era el deseo de los autores.

Figura 3. Bancada de los tres edómetros automáticos utilizados en este trabajo.

Para la realización de los ensayos edométricos se siguieron las directrices recogidas en la parte 5 de la norma UNE-EN-ISO-17892 [13]. En los ensayos llevados a cabo se utilizaron tensiones normales de 8, 16, 32, 64, 128 y 256 kPa, de modo que se sometió al material a un ciclo de carga y otro de descarga. En el ciclo de carga cada escalón de carga permitía duplicar ésta y se aplicaba de forma automática cuando se alcanzaba una deformación máxima de 0,005 mm durante un mínimo de 3 horas, entendiendo que en ese momento se había alcanzado la consolidación primaria. Por su parte, en el ciclo de descarga, la carga aplicada se reducía a la mitad una vez transcurrían al menos 3 horas con la misma deformación máxima considerada en el proceso de carga. Es importante tener en cuenta que para la determinación del módulo edométrico del material únicamente se tiene en cuenta la curva de descarga, aunque en el apartado de resultados se mostrarán ambas para tener una visión completa del comportamiento del material a lo largo de cada ensayo completo. En este caso se realizaron nueve repeticiones con el fin de obtener un resultado fiable.

2.3. Peso específico aparente

El último de los ensayos realizados en el presente trabajo permitió la determinación del peso específico aparente del material. En este caso los ensayos se realizaron siguiendo las indicaciones recogidas en la parte 2 de la norma UNE-EN-ISO 17892 [14]. En este caso, solamente se pueden aportar los datos referidos al peso específico aparente inicial del material, si bien más adelante se llevarán a cabo los ensayos correspondientes que permitirán determinar la variación de este parámetro a medida que se incrementa la tensión normal aplicada a la muestra. Se realizaron tres repeticiones con el fin de poder obtener un dato representativo para este parámetro.

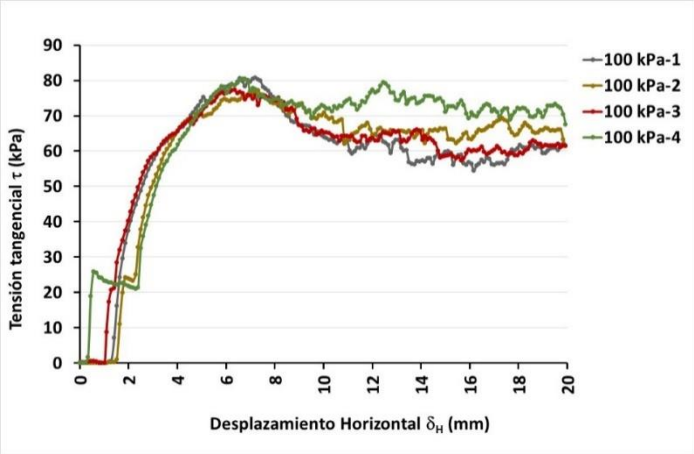
3. Resultados y Discusión

3.1. Ensayos de corte directo

3.1.1. Ángulo de rozamiento interno y cohesión aparente

De los ensayos de corte directo realizados, en la figura 4 se muestra la forma de las curvas tensión-deformación obtenidas en cada una de las tres repeticiones llevadas a cabo al aplicar una tensión normal de 100 kPa).

Figura 4. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de corte directo a una tensión normal aplicada de 100 kPa.



Como se puede apreciar en la imagen anterior, al poco de comenzar el ensayo, y hasta alcanzar una deformación horizontal de 2 mm, aproximadamente, se observó una inflexión en las curvas, suavizándose la pendiente de ésta, volviéndose las curvas horizontales e incluso descendiendo éstas un poco para, seguidamente, volver a experimentar un incremento en la resistencia ofrecida al corte. Este fenómeno se pudo observar a otras tensiones normales aplicadas, aunque no en todas las repeticiones llevadas a cabo a la misma tensión normal, como se puede apreciar en la figura 5, en la que se muestra una imagen del conjunto de ensayos

llevados a cabo a una tensión normal de 10 kPa y en la que se puede comoprobar cómo en algunos ensayos esa disminución de la tensión normal se produce antes y en otros un poco más tarde, pero siempre en ese intervalo de los dos primeros milímetros de desplazamiento horizontal, e incluso en algunos de ellos, como ocurre en el primero de los cuatro ensayos realizados en estas condiciones, el material inicialmente no ofrece resistencia, pero posteriormente sí, sin que apenas se produzca esa disminución en la resistencia al corte hasta que alcanza el valor pico a una deformación horizontal considerable, próxima a los 10 mm.

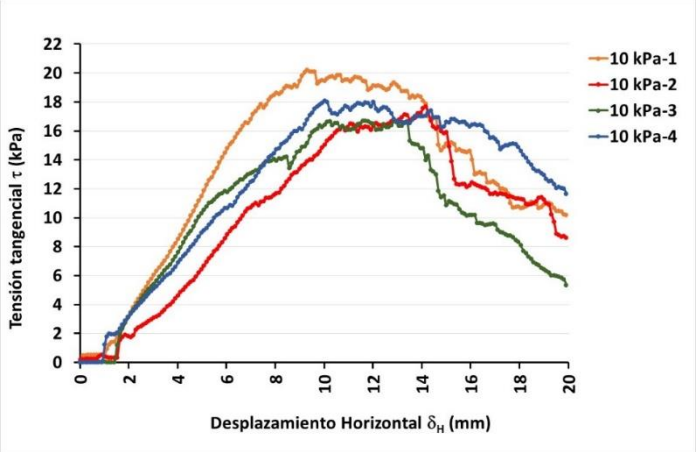


Figura 5. Curvas tensión-deformación obtenidas en cada una de las repeticiones llevadas a cabo en los ensayos de corte directo a una tensión normal de 10 kPa.

Se desconoce si este efecto se debe a las diferencias observadas en el tamaño de las partículas en el material proporcionado para este estudio o si es que, por alguna razón, tras ofrecer una resistencia inicial propia de un comportamiento elástico del material, éste entra en una fase plástica para, posteriormente, volver a comportarse de manera elástica. Por ello, se van a realizar ensayos de corte directo separando la muestra según su tamaño para comprobar si se sigue repitiendo este comportamiento en ocasiones o no.

Independientemente de esa tendencia observada en los estadios iniciales de los ensayos realizados, en las figuras facilitadas anteriormente se puede comprobar cómo en general la granza registra un valor máximo y, posteriormente, la resistencia al corte disminuye sensiblemente, fluctuando en ocasiones hacia valores más altos o más bajos pero con una tendencia, en general bastante clara, al descenso de dicha resistencia a altas deformaciones horizontales, como sería el caso de la figura 5, o al mantenimiento de ésta pero en valores ligeramente inferiores a ese valor pico, como ocurre en la figura 4. Este comportamiento es comparable al observado en otros materiales de origen agroforestal, como los pellets de madera de pino [8]. Lógicamente, la tensión tangencial máxima alcanzada en cada caso está supeditada a la tensión normal aplicada, pues cuanto más comprimida esté la muestra utilizada en el ensayo, mayor será la resistencia que éste ofrece al corte.

Como resultado de los distintos ensayos llevados a cabo a las diferentes tensiones tangenciales seleccionadas en el presente trabajo, se han obtenido los valores máximos para la tensión tangencial a las distintas tensiones normales aplicadas, de modo que se ha podido trazar la recta de regresión, como se muestra en la figura 6.

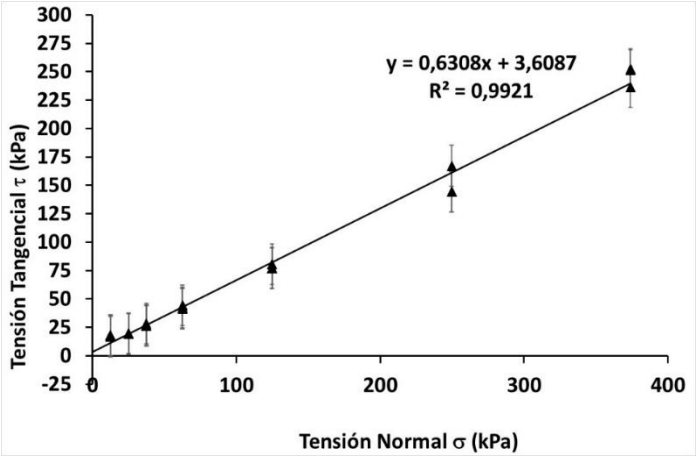


Figura 6. Recta de regresión obtenida en los ensayos de corte directo realizados con granza.

A partir de la figura anterior se ha podido determinar el ángulo de rozamiento interno (□) y la cohesión aparente del material (*C*). El primero corresponde al ángulo que forma la recta de regresión con la horizontal, mientras que la segunda corresponde al punto en el que dicha recta interseca con el eje de ordenadas. Los valores obtenidos para ellos se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Valores del ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente de la granza.

Ángulo de rozamiento interno (□)	**Cohesión aparente (*C*)**
32,2°	3,61 kPa

El valor del ángulo de rozamiento interno es similar al obtenido para el maíz variedad P0023 a una humedad del 17,4% en base seca [12], o maíz Mieszko al 15% de humedad o colza Liscosmos al 12% [7]. Por su parte, el valor de la cohesión aparente es bastante bajo, algo esperado teniendo en cuenta las características del material utilizado.

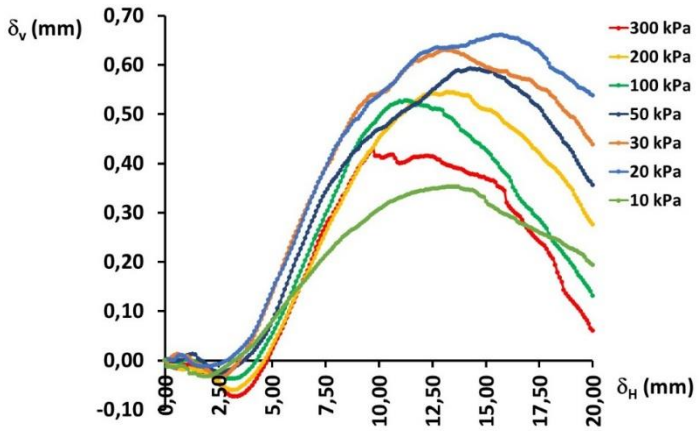
3.1.2. Ángulo de dilatancia

Como se comentó en el apartado de material y métodos, los ensayos de corte directo llevados a cabo han permitido determinar el ángulo de dilatancia de la granza. Para ello, se hace preciso conocer los valores de la deformación vertical registrada en la muestra a medida que se realiza el corte, representando ésta en

función de la deformación horizontal alcanzada en cada momento. En la figura 7 se muestran las curvas de deformación medias obtenidas para este material a las distintas tensiones normales aplicadas a partir de las distintas repeticiones llevadas a cabo para las tensiones normales consideradas (10, 20, 30, 50, 100, 200 y 300 kPa):

Figura 7. Curvas de deformación vertical frente a la deformación horizontal obtenidas para la granza a las distintas tensiones normales aplicadas en los ensayos de corte directo.

En la figura anterior se puede observar cómo la máxima deformación vertical se alcanza al aplicar una tensión normal de 20 kPa. A priori, el resultado es un poco sorprendente pues en principio se esperaba que fuera la curva correspondiente a la menor tensión normal aplicada, 10 kPa, la que proporcionara dicho valor. De hecho, no sólo no se cumplió ese pronóstico, sino que esta curva fue la que, de media, proporcionó la menor deformación vertical del total de tensiones normales



aplicadas. De manera similar, la deformación vertical fue mayor al aplicar una tensión normal de 200 kPa que la observada a 100 kPa.

En cuanto a los valores medios obtenidos para el ángulo de dilatancia a partir de las curvas anteriores, en la tabla 2 se ofrecen éstos en función de la tensión normal aplicada en cada caso:

Tabla 2. Valores del ángulo de dilatancia de la granza en función de la tensión normal aplicada.

Tensión normal □ (kPa)	Ángulo de dilatancia (□)
10	11,3°
20	19,5°
30	17,7°
50	18,7°
100	19,9°
200	19,0°
300	17,7°

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el valor medio máximo para este parámetro (19,9°) se alcanzó al aplicar una tensión normal de 100 kPa, mientras que el más bajo se obtuvo al aplicar una tensión normal de 10 kPa. Esto supone que dicho valor máximo fue un 73% más alto que el valor medio mínimo registrado. Si se comparan estos valores con los obtenidos en pellets de madera [8], éstos están sensiblemente por debajo de los alcanzados a tensiones de 20 y 30 kPa, se asemejan al alcanzado a 100 kPa y están claramente por encima de los publicados a tensiones normales de 200 y 300 kPa.

3.1.3. Ángulo de rozamiento con la pared

Como se comentó en el apartado de material y métodos, se realizó una modificación de la semicaja inferior de la caja de corte para poder colocar en ella una chapa metálica lisa que simularía el rozamiento con la pared del silo metálico en el que se almacenase el material. La figura 8 muestra el resultado obtenido para la curva tensión-deformación a una tensión normal de 30 kPa:

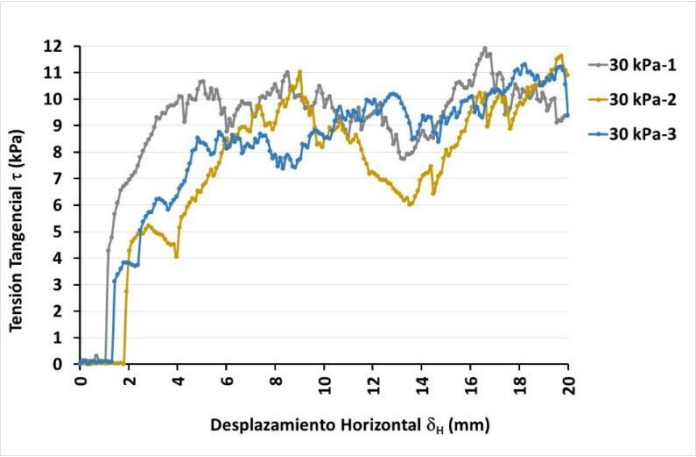


Figura 8. Curvas tensión-deformación obtenidas en cada una de las repeticiones llevadas a cabo en los ensayos de corte directo con caja modificada a una tensión normal de 30 kPa.

Como se puede observar en la figura anterior, en todos los casos se alcanza un primer valor pico, después se produce una disminución de la resistencia al corte y en el último tramo del ensayo, a partir de los 15 mm de desplazamiento horizontal, la granza vuelve a incrementar su resistencia alcanzando los valores más altos de todo el ensayo. También se observa cómo en el tercer ensayo, una vez alcanzado el primer milímetro de desplazamiento horizontal, se produce la relajación de la resistencia ofrecida al corte, mientras que en los ensayos 1 y 3 inicialmente el material no ofrece resistencia y después, en ambos casos antes de que se haya desplazado horizontalmente la caja de corte 2 mm, se produce el incremento de la resistencia al corte. Para el resto de las tensiones normales aplicadas se obtuvieron tendencias similares a la que aquí se muestra.

Por su parte, la recta de regresión obtenida en esta modalidad de ensayo se muestra en la figura 9:

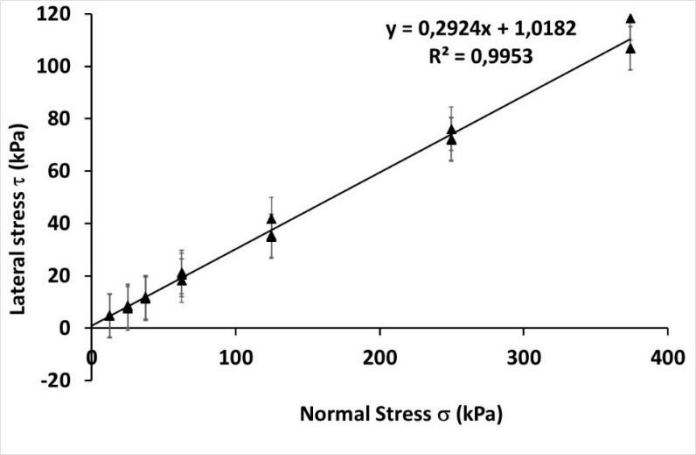


Figura 9. Recta de regresión obtenida en los ensayos de corte directo con caja de corte modificada realizados con granza.

El resultado obtenido para el coeficiente de rozamiento con chapa lisa se proporciona en la tabla 3:

Tabla 3. Valor del coeficiente de rozamiento con chapa lisa.

Material	Coeficiente de rozamiento con chapa lisa (□)
Granza	0,29

El valor obtenido para este parámetro es comparable al publicado para el trigo [8] o al maíz a bajas tensiones normales [7] y, desde luego, sensiblemente inferior, un 56% menor, que el obtenido para los pellets de trigo [8].

3.2. Ensayos edométricos

La figura 10 muestra los resultados de los ensayos edométricos llevados a cabo:

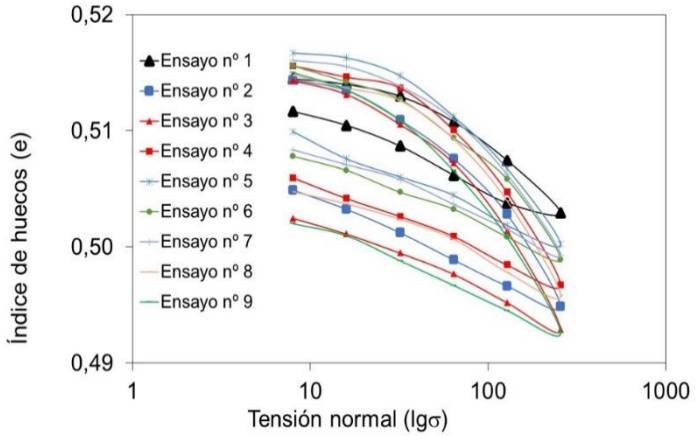


Figura 10. Curvas edométricas obtenidas en los diferentes ensayos realizados con granza.

Como se puede apreciar en la figura anterior, hubo bastante homogeneidad en los resultados obtenidos en las nueve repeticiones llevadas a cabo pues el índice de huecos osciló entre 0,49 y 0,52. Dicho rango de variación ha sido sensiblemente inferior al observado en pellets de madera [8]. Seguidamente, en la tabla 4, se muestran los resultados obtenidos para el módulo edométrico del material a las distintas tensiones normales aplicadas, los cuales servirán para determinar el módulo de elasticidad una vez se realicen los ensayos triaxiales correspondientes.

Tabla 4. Valores del módulo edométrico del material a las distintas tensiones normales aplicadas.

Tensión normal (kPa)	**Módulo edométrico *E' (kpa)***
8	7556
16	19506
32	16635
64	18338
128	24622
256	33317
128	163614
64	41324
32	19883
16	12763
8	8654

Como se comentó anteriormente, de los valores proporcionados en la tabla anterior para el módulo edométrico los que se elegirán para determinar el módulo de elasticidad serán los correspondientes al ciclo de descarga, pues es donde se puede conocer la capacidad de recuperación que posee el material después de haber estado sometido a una elevada carga de compresión.

3.3. Peso específico aparente

Para finalizar, se muestra el resultado obtenido para el peso específico aparente del material en condiciones iniciales tras haber realizado tres repeticiones de éste sin estar sometido a una carga normal de compresión, pues los correspondientes ensayos no se han podido llevar a cabo hasta el momento de presentar este trabajo. La tabla 5 muestra el resultado obtenido:

Tabla 5. Valor del peso específico aparente de la granza.

Material	**Peso específico aparente □□□*kN/m3*)**
Granza	8,27

Al comparar este valor con el obtenido en otros materiales granulares por otros autores [7,8], se observa que es ligeramente mayor (entre un 3,5 y un 7,0%) que el del trigo, aproximadamente un 11% mayor que el obtenido para el maíz y un 17% mayor que el facilitado para los pellets de madera.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer del presente trabajo son las siguientes:

En los ensayos de corte directo, al determinar las curvas tensión-deformación se observa cómo los pellets de plástico se comportan de manera similar a la observada en pellets de plástico, alcanzando un valor pico de la resistencia al corte para, posteriormente, experimentar una disminución progresiva con altibajos a valores elevados del desplazamiento horizontal.

En gran parte de los ensayos de corte directo llevados a cabo se observa que, a desplazamientos horizontales inferiores a los 2 milímetros, la resistencia que ofrece la granza al corte sufre un estancamiento, volviéndose horizontal, o incluso descendente, la curva tensión-deformación correspondiente. Quizás la diferencia del tamaño de partícula observada en las muestras del material o el hecho de que éste pudiera comportarse de una manera plástica, en lugar de elástica, de manera puntual, podría explicar dicho comportamiento. Por ello, será preciso realizar más ensayos en el futuro para profundizar en las causas que originan dicho comportamiento.

En todos los ensayos de corte directo realizados se comprobó que la granza fue capaz de presentar dilatancia a las distintas tensiones normales aplicadas, alcanzando un valor máximo del ángulo de dilatancia de 19,9°.

De los ensayos de corte directo realizados modificando la caja de corte directo se deduce que el coeficiente de rozamiento con chapa metálica alcanza un valor sensiblemente inferior al obtenido en pellets de madera, asemejándose más a los obtenidos en otros materiales como trigo o maíz.

Las curvas edométricas obtenidas en las distintas repeticiones llevadas a cabo mostraron una gran homogeneidad, permitiendo determinar los valores del módulo edométrico a distintas tensiones normales.

Será preciso completar los ensayos más adelante para poder determinar ciertos parámetros, como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson o la variación del peso específico aparente con la tensión normal para completar la caracterización mecánica del material.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Investigación por financiar el proyecto "Estudio del comportamiento estructural de silos de pared corrugada mediante modelos de elementos discretos (SILODEM)" con referencia PID2019-107051GB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

1. Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics Recycling: Challenges and Opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 2009, 364, 2115–2126.
2. Handayani, S.U.; Fahrudin, M.; Mangestiyono, W.; Fadlu, A. Mechanical Properties of Commercial Recycled Polypropylene from Plastic Waste. Journal of Vocational Studies on Applied Research 2021, 3, 1–4, doi:10.14710/jvsar.3.1.2021.1-4.
3. Osama, M.M.; Selmy, A.I.; Abdelhaleem, A.M.M.; Megahed, A.A. In-Plane Shear and Tensile Behavior of Two-Pass Injection-Molded Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites with Different Fiber Lengths. J Compos Mater 2023, 57, 95–109, doi:10.1177/00219983221138960.
4. Gustavo Barbosa, L.; Piaia, M.; Henrique Ceni, G. Analysis of Impact and Tensile Properties of Recycled Polypropylene. International Journal of Materials Engineering 2017, 7, 117–120, doi:10.5923/j.ijme.20170706.03.
5. Borkar, A.; Hendlmeier, A.; Simon, Z.; Randall, J.D.; Stojcevski, F.; Henderson, L.C. A Comparison of Mechanical Properties of Recycled High-Density Polyethylene/Waste Carbon Fiber via Injection Molding and 3D Printing. Polym Compos 2022, 43, 2408–2418, doi:10.1002/pc.26550.
6. Badu, R.R.; Purnomo, C.W.; Kamulyan, B. Plastic Waste Recycle into Pellet: Economic Analysis and Processing Temperature Effects. Key Eng Mater 2022, 920, 129–136, doi:10.4028/p-t0ac0q.
7. Molenda, M.; Horabik, J. Mechanical Properties of Granular Agro-Materials and Food Powders for Industrial Practice. Part I: Characterization of Mechanical Properties of Particulate Solids for Storage and Handling.; 2005; ISBN 83-89969-35-1.
8. Moya, M.; Sánchez, D.; Villar-García, J.R. Values for the Mechanical Properties of Wheat, Maize and Wood Pellets for Use in Silo Load Calculations Involving Numerical Methods. Agronomy 2022, 12, doi:10.3390/agronomy12061261.
9. Kruszelnicka, W. Study of Selected Physical-Mechanical Properties of Corn Grains Important from the Point of View of Mechanical Processing Systems Designing. Materials 2021, 14, doi:10.3390/ma14061467.
10. Madrid, M.A.; Fuentes, J.M.; Ayuga, F.; Gallego, E. Determination of the Angle of Repose and Coefficient of Rolling Friction for Wood Pellets. Agronomy 2022, 12, doi:10.3390/agronomy12020424.
11. UNE-EN ISO 17892-10 Geotechnical Investigation and Testing. Laboratory Testing of Soil. Part 10: Direct Shear Tests 2018.
12. Moya-Ignacio, M.; Sánchez, D.; Romero, J.Á.; Villar-García, J.R. Study of Various Mechanical Properties of Maize (Zea Mays) as Influenced by Moisture Content. Agronomy 2024, 14, doi:10.3390/agronomy14081613.
13. UNE-EN ISO 17892-5 Geotechnical Investigation and Testing. Laboratory Testing of Soil. Part 5: Incremental Loading Oedometer Test 2017.
14. UNE-EN ISO 17892-2 Geotechnical Investigation and Testing. Laboratory Testing of Soil. Part 2: Determination of Bulk Density. 2014.

PARTE 10

PRODUÇÃO ANIMAL / AQUACULTURA

PRODUCCIÓN ANIMAL/ ACUICULTURA

Índice

Transitioning to rabbit does group housing in commercial production systems: Preliminary study 1067

Diferenças entre as metodologias de “Balanço de massa” e “Fluxo de gás” na determinação das emissões de gases na produção de suínos 1074

produzidos em ambiente climatizado e não climatizado, nas fases de crescimento e terminação no Brasil 1087

Reprodução assistida por meio da inseminação artificial em tempo fixo (IATF): uma análise dos manuais orientativos disponíveis para produtores leiteiros 1102

Empleo de la tecnología EBD para mejorar la valorización de purines de porcino con menos carga contaminante y de nitrógeno 1116

Sistema Automatizado de Monitoreo de Puesta en Gallinas Negra Castellana Mediante Sensores de Peso e Infraestructura IoT 1126

Transitioning to rabbit does group housing in commercial production systems: Preliminary study

C.L. Manuelian[1,*], A.A.K. Salama[1], X. Such[1], J. L. Ruiz de la Torre[2], C. Casas[3], R. Costa[2] and F.X. Mora[1]

1 Dept. Ciencia Animal i dels Alimen, UAB, 08193 Cerdanyola del Vallés, Spain;

2 Servei de Granges i de Camps Experimentlas. UAB, 08193 Cerdanyola del Vallés, Spain

3 Riera, 8480 L'Atmetlla del Vallès, Spain

* Correspondence: carmen.manuelian@uab.cat

Abstract: This study compares single- and group-housed does productivity. Does (4.7±0.3 kg) were divided into 3 groups: G1 (8 does individually housed in standard cages), G4 (4 does/group), and G8 (8 does/group). Group housing (1.6×1.5×0.6 m) had individual nests, shared waterers, and a feeder platform. G1 does body weight (BW) increased from 1st kidling (4.42±0.15 kg/doe) to the end of the study (4.91±0.15 kg/doe; P<0.001), 1st kindling rate was 63%, prolificacy was 10.2 kits/parturition, and 2nd fertility rate was 100%. G4 does BW decreased from 1st kindling (4.71±0.22 kg/doe) to the end of the study (4.28±0.22 kg/doe; P=0.018), 1st kindling rate was 100%, prolificacy was 12.3 kits/parturition, and 2nd fertility rate was 0%. G4 had mild injuries that healed fast and kindled in separate nests with all kits born alive on the 1st parturition. G8 does BW increased from 1st kindling (4.41±0.15 kg/doe) to the end of the study (4.70±0.15 kg/doe; P<0.001), 1st kindling rate was 63% and prolificacy was 10.2 kits/parturition, and 2nd fertility rate was 12.5%. In G8, fights and injuries started earlier and were more frequent and severe than G4, and 2 does kindled in the same nest. Overall, 8 does/group seemed too high, whereas 4 does/group was promising.

Keywords: Fertility; Group-housing; Polificacy; Regulation

1. Introduction

The new EU regulations for rabbit farming will probably establish group housing requirements for does to improve animal welfare. However, so far, studies conducted in this area have described issues of chronic stress, aggression, and injuries, as well as a higher risk of diseases and mortality [1,2], which also affects the productivity of the does. Part-time group housing systems to ensure high fertility and prolificacy have also shown an increase in aggressive behaviors (biting, threatening, and attacking) whenever the does are grouped together [3]. The objective was to evaluate the feasibility of full-time group housing for does.

2. Materials and Methods

2.1. Animals and Housing

A total of 20 nulliparous New Zealand White does (4.7 ± 0.3 kg) were divided into 3 groups: G1, 8 does housed individually; G4, 4 does/group; G8, 8 does/group. Does were dewormed and vaccinated against Myxomatosis and Rabbit Hemorrhagic Disease before the trial. For G1, standard individual housing in cages (0.8 × 0.38 × 0.4 m) was used. For G4 and G8, a group housing prototype of 1.6 × 1.5 × 0.6 m with individual nests, shared drinkers 11 cm above the ground, and a feeder of 2 × 4 mouths on a platform (1.0 × 0.7 m) at 20 cm from the slat floor that allows does to hide underneath was used. All does were inseminated (AI) and housed individually for the first 18 days, after which the treatments began. The planned interval between births was 42 days, and weaning at 32 days. Nest were The sandwich-type nests with woody shavings were checked daily.

2.2. Monitor Food Consumption, Weight, and Behavior

Food consumption and weight were monitored weekly from the start of the study (W-2) until 3 days before the second birth (W5), at which point the study ended. The weekly observation protocol included: cleanliness and functionality of the feeder and drinker; temperature and humidity control of the housing and panting of the animals; the presence of dirty animals according to the Classyfarm protocol [4] from 0 (perfectly clean, uniform, smooth, and dry coat) to 2 (dirt covers >30% of the coat); skin lesions and wounds according to De Jong et al. [5], where the head and ears, body and limbs, genitals or anus, and tail are examined and scored from 0 to 3, where 0 is no wounds and 3 is a bleeding wound; hairless areas of ≥ 2 cm [6]; the presence of pododermatitis from 0 (healthy pad) to 4 (open wound) according to De Jong et al. [5]. Wounds are considered in the ears if they measures > 2 cm [6].

Behavior was evaluated with daily observation 3 times a day throughout the study from Monday to Friday, and twice daily on weekends. A sweep was made by group, and the following animals spatial distribution were recorded: number of does in the nest, the patio, the feeder, or under the feeder. Moreover, it was also recorded if any of the following behaviors were observed: jumping, running, stretching, attacking, standing up, mounting, and grooming.

2.3. Statistical Analysis

Statistical analyses were carried out with SAS v 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). The normality of the data for food consumption and weight of the does, and kits were confirmed with PROC UNIVARIATE based on data distribution, QQPLOT, and Shapiro-Wilk test. The evolution of the average daily food consumption of the does

and the average weight of the kits per group were evaluated using PROC GLM with Tukey correction. The evolution of the individual average daily weight of the does throughout the study and of the kits up to 3 weeks of age (W0 to W2) was evaluated with PROC MIXED with group, week, and interaction as fixed effects, and the animal nested in the group as a random factor. Fertility, prolificacy, and behavior data are presented descriptively. Fertility was calculated as [(number of births/number of inseminated) × 100] and prolificacy as (live and dead births)/birth.

3. Results

3.1. Does Consumption, Weight, and Fertility

The average consumption of the does progressively increased as lactation progressed, starting to decrease again at the time of weaning, from 0.098 ± 0.119 kg in the week before the first kindling (W-1) to 0.704 ± 0.119 kg in the week before the second first kindling (W5; P = 0.037).

Does' weight was similar between groups throughout the study, while there were significant differences between weeks. The interaction between group and week was also significant, as fertility differed between groups (Fig. 1). In the first AI, only 5 G1 does kindle (Fertility, 62.5%), while all of them kindle in the 2nd mating (Fertility, 100%). This explains the significant weight increase in G1 from W0 (4.42 ± 0.15 kg/animal) to W5 (4.91 ± 0.15 kg/animal; P < 0.001; Fig. 1). On the other hand, in the first AI, all 4 G4 does kindle (Fertility, 100%), while none of them became pregnant in the 2nd mating, decreasing weight from W2 (4.71 ± 0.22 kg/animal) to W5 (4.28 ± 0.22 kg/animal; P = 0.018; Fig. 1). In the first AI, only 6 G8 does gave birth (Fertility, 75.0%), while only 1 kindle non-viable kits in the 2nd mating at 28 days of gestation (Fertility, 12.5%). Therefore, in G8, a weight decrease was observed from the start of the study (W-2, 4.79 ± 0.15 kg/animal) to the first kindle (W0, 4.41 ± 0.15 kg/animal; P < 0.001), and a weight increase until W4 (W5, 4.70 ± 0.15 kg/animal; P = 0.028; Fig. 1).

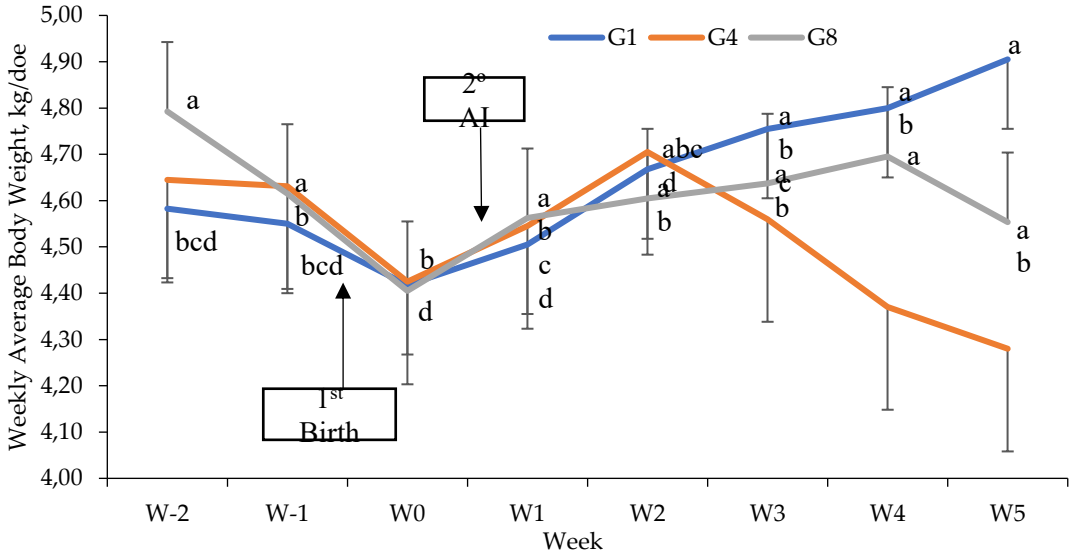


Figure 1. Weekly evolution of the average weight of the does during the study. The approximate time of the 1st kindle and the 2nd insemination (AI) is indicated. [a,b,c,d] Within each group, different letters indicate differences at P < 0.05.

3.2. Birth, Prolificacy, and Kits Weight

In the first kindle, each G4 doe kindled in a separate nest, the kits grew well, and no mortality was recorded after the first 3 days of birth until day 13 of lactation. At that time, a nest with all the kits dead was found (average kit weight, 85 g). When the kits started to leave and enter the nest, the number of kits per nest fluctuated, keeping the total group stable. In the first kindle, one G8 doe kindled outside the nest due to a fight at the time of birth, and 3 of the 11 kits were rescued and distributed among the other 3 nests that already had kits. Two does kindled in the same nest within less than 24 h, so 7 kits were given in adoption to another active nest from the same group. Four active nests remained until day 13 of lactation, when a nest with all the kits dead was found (7 kits; average kit weight, 80 g).

Table 1 shows the number of born alive and dead kits per group, and the losses from the day after kindling until weaning for the first kindle. Prolificacy was 10.2 kits/kindling for G1, 12.3 kits/kindling for G4, and 8.1 kits/kindling for G8. The average weight of the kits per group increased from 65.9 ± 11.7 g two days after birth (W0) to 735.1 ± 11.7 g at weaning at 32 days (W4) of age (P < 0.001) with a significant increase between all weeks. The average individual weight of the kits was similar between groups (Fig. 1).

Table 1. This is a table. Tables should be placed in the main text near to the first time they are cited.

Group	Born Alive	Born Dead	Mortality (n)
G1	48	3	6
G4	49	0	13

G8	53	4	18

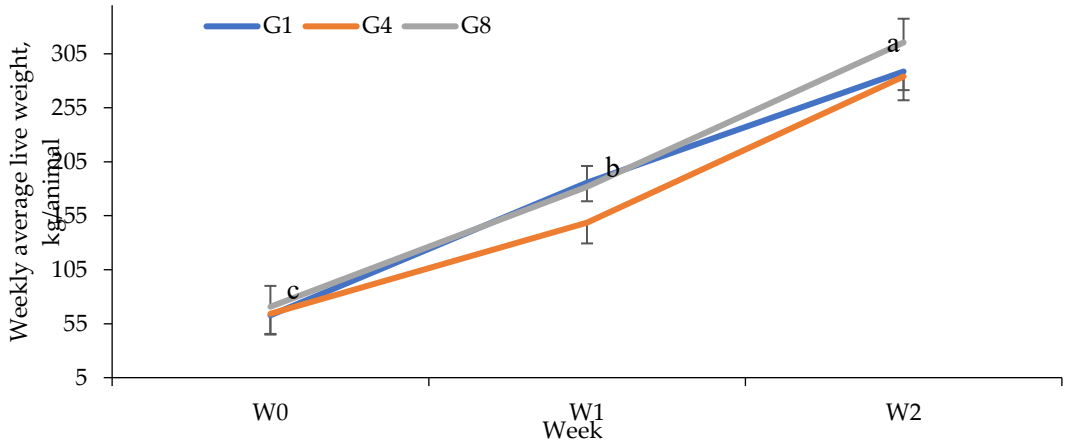


Figure 2. Weekly evolution of the average weight of the kits during the first two weeks of life. [a,b,c] Within each group, different letters indicate differences at P < 0.05.

3.3. Behaviour

In G1, does did not show any injuries beyond slight alopecia on the nose area from scratching with the feeder and pulling each other's hair through the cage bars. Positive behaviors such as body contact, nose-body contact, sniffing, and nose-to-nose contact were limited as they could not interact freely with neighboring does. Some stereotypies, such as cage biting, were also observed.

In G4, does presented mild injuries (grade 1) that healed quickly without intervention, and showed some alopecia in the nose area. Some fights were observed, but the does had enough space to escape and hide both in the nests and under or on top of the feeder platform. The injuries were concentrated on the tips of the ears. No stereotypies were observed, and positive behaviors such as body contact, nose-body contact, sniffing, and nose-to-nose contact were frequently recorded. Some negative social behaviors such as does biting each other were also recorded.

In G8, negative social behaviors such as does biting each other were recorded more frequently. Additionally, intensity of fights increased as the study progressed, causing ear wounds > 2 cm, and on several occasions, bleeding wounds (grade 3). No stereotypies were observed, and positive behaviors were also recorded such as body contact, nose-body contact, sniffing, and nose-to-nose contact. The study was terminated as 2 does from G8 had to be isolated from the group to recover from severe injuries caused by fights with their group mates, which had resulted in the loss of more than a third of their ear.

4. Discussion

The Ebene Protocol [7] described as positive behaviors in rabbit farming body contact, nose-body contact, sniffing, and nose-to-nose contact. Although those behaviors were detected in all 3 experimental groups, they were more frequent in group-housing than individual cages, suggesting a better welfare of the animal from this point of view.

On the other hand, Dalmau et al. [6] described stereotypes of scratching with the feeder and pulling each other's hair through the cage bars. Those stereotypes were only observed in the does housed in individual cages, which suggested that group housing could be a good alternative to reduce those negative behaviors. A stereotypy is defined as a repetitive, invariant behavior pattern with no apparent goal or function. These behaviors are often observed in captive animals and can indicate stress or a lack of environmental stimulation. Common examples of stereotypies in animals include rocking, pacing, and bar-biting.

Moreover, Dalmau et al. [6] described biting and fighting in animal groups as negative behaviors that significantly impair animal welfare. Those behaviors were only observed in G4 and G8 because in individual cages, interaction between animals is quite limited. In G4, fights and injuries were lower than those reported by Szendrő et al. [8], where there was a high incidence of fights and injuries in groups of 4 does. Similarly, fertility in the first kindling was higher in G4 and G8 than indicated by Szendrő et al. [2], where they did not reach 50%. In G8, the fact that two does kindled in the same nest without causing aggressive conflicts between them or against the kits, in line with the review by Szendrő et al. [8]. However, the nest with the two does maintained 16 live kits until weaning, which contrasts with Szendrő et al. [2], who observed high mortality of kits born in shared nests.

5. Conclusions

In conclusion, individual housing yielded the best results in terms of avoiding fights, fertility, and kit mortality, but stereotypies were observed. The group of 8 does suggested a high density, as they showed an increase in aggression, shared nests, and lower fertility, although positive social behaviors were also recorded. The group of 4 does proved promising when grouped once pregnant, as they frequently exhibited positive social behaviors, no stereotypies were observed, and fights were infrequent and without significant injuries. Future studies will focus on creating stable groups of does from weaning to improve socialization, reduce injuries, and increase fertility.

Author Contributions: Conceptualization, all; methodology, all; software, C.L.M.; validation, C.L.M., F.X.M.; formal analysis, C.L.M.; investigation, C.L.M.; resources, C.C., C.L.M., J.L.R.T., A.A.K.; data curation, C.L.M.; writing—original draft preparation, C.L.M.; writing—review and editing, all; visualization, C.L.M.; supervision, X.S, F.X.M.; project administration, C.L.M.; funding acquisition, A.A.K., C.L.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Ajuts Activitat Demostració, Generalitat de Catalunya DARPA (Bienestar y rentabilidad: diseño de parques para cría de conejas en grupo/Welfare and profitability: design of parks for group housing of does). Activity co-financed by the EU through intervention 7201 of the PEPAC 2023-2027.

Institutional Review Board Statement: This study was approved by the by the Ethical Committee of Animal and Human Experimentation (CEEAH, references 5426-CEEA-UAB) of the Universitat Autònoma de Barcelona.

Acknowledgments: The authors are grateful to the team of the Servei de Granges i Camps Experimentals of the UAB (Bellaterra, Spain) for the technical assistance and care of the animals.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Szendrő, Zs.; McNitt, J.I. Housing of rabbit does: Group and individual systems: A review. Livest Sci. 2012, 150, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.09.017
2. Szendrő, Zs.; Mikó, A.; Odermatt, M.; Gerencsér, Zs.; Radnai, I.; Dezséry, B.; Garai, É.; Nagy, I.; Szendrő, K.; Matics, Zs. Comparison of performance and welfare of single-caged and group-housed rabbit does. Anim 2013, 7, 463-468. https://doi.org/10.1017/S1751731112001760
3. Zomeño, C.; Birolo, M.; Zuffellato, A.; Xiccato, G.; Trocino, A. Aggressiveness in group-housed rabbit does: Influence of group size and pen characteristics. Appl Anim Behav. Sci. 2017, 194, 79-85. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.05.016
4. Classyfarm. 2022. Animal welfare assessment in rabbit farming: Manual for official controls. Drafted in 2022, under approval. http://www.classyfarm.it http://www.classyfarm.it
5. De Jong, I.C.; Reuvekamp, B.F.; Rommers, J.M. A welfare assessment protocol for commercially housed rabbits. Report 532. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad, Netherland, 2011. https://edepot.wur.nl/197480
6. Dalmau, A.; Moles, X.; Pallerisa, J. Animal welfare assessment protocol for does, bucks, and kit rabbits reared for production. Front Vet Sci. 2020, 7, 445. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00445
7. ITAVI, 2018. Evaluer le bien-être des lapins en maternité et en croissance. Protocole EBENE. https://www.itavi.asso.fr/publications/protocole-ebene-guide-pour-lesutilisateurs/download/627bbc3fcf0cd_EBENE_Protocole_Lapin.pdf
8. Szendrő, Zs.; McNitt, J.I.; Matics, Zs.; Mikó, A.; Gerencsér, Zs. Alternative and enriched housing systems for breeding does:a review. World Rabbit Sci. 2016, 24, 1-14. https://doi.org/10.4995/wrs.2016.3801

Diferenças entre as metodologias de “Balanço de massa” e “Fluxo de gás” na determinação das emissões de gases na produção de suínos

Paulo Armando V. de Oliveira [1,*], Arlei Coldebella [1], Victoria C. B. Marcanzoni [2] e Jorge M. R. Tavares [3,4,]

[1] Embrapa Suínos e Aves, Caixa Postal 21, 89.700-000 Concórdia/SC, Brasil; paulo.armando@embrapa.br; arlei.coldebella@embrapa.br.

[2] Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Chapecó/SC, Brasil; victoriabonassi@gmail.com.

[3] Instituto Politécnico de Beja, Escola Superior Agrária, 7800-309 Beja, Portugal; jorge.tavares@ipbeja.pt.

[4] Center for Sci-Tech Research in EArth sysTem and Energy (CREATE), Polo IPBeja, Apartado 6155, 7800-295 Beja, Portugal.

* Correspondente: paulo.armando@embrapa.br; Tel.: (+55) 49999118193

Resumo: O principal desafio da suinicultura brasileira é adequar a ambiência dos edifícios de alojamento às variações climáticas nas regiões produtoras, uma vez que estas influenciam tanto os indicadores zootécnicos de desempenho dos animais como as emissões de gases. O objetivo deste estudo foi avaliar a emissão de CO_2 e NH_3, comparando os resultados obtidos com recurso a duas metodologias distintas de quantificação destas emissões, na fase fisiológica de crescimento-terminação em suínos: (1) o balanço de massa, e (2) fluxo de gás. O trabalho foi conduzido numa sala climatizada equipada com ventilação forçada, aquecimento e resfriamento, mantendo as condições dentro da zona de conforto térmico dos suínos. A instalação contou com 20 baias, piso parcialmente ripado e capacidade para 5 suínos por baia (1,35 m²/suíno). As observações foram realizadas ao longo de três ciclos produtivos (100 suínos por ciclo). A sala foi equipada com sistemas de registo de temperatura e humidade relativa, medição das concentrações de CO_2 e NH_3, e velocidade do ar. A avaliação da concentração de gases foi realizada com um analisador fotoacústico INNOVA 1412 e sensores específicos. A temperatura e a humidade médias registadas na sala foram de 21,7±1,2 °C e 87,3±11,5%, respetivamente. As emissões médias observadas foram: para o balanço de massa, 2,23 kg CO_2/suíno/dia (máximo 3,72; mínimo 1,01) e 2,25 g NH_3/suíno/dia (máximo 5,23; mínimo 0,79); para o fluxo de gás, 1,44 kg CO_2/suíno/dia (máximo 2,86; mínimo 0,62) e 3,61 g NH_3/suíno/dia (máximo 7,75; mínimo 1,98).

Palavra Chave: suínos, emissão de gás, CO2 e NH3.

1. Introdução

A produção suinícola é uma atividade intensiva que gera preocupações ambientais relevantes, sobretudo no que se refere à emissão de gases com efeito de estufa (GEE) e amoníaco (NH_3), os quais têm origem, principalmente, na respiração animal

e na gestão dos chorumes produzidos, sendo as condições ambientais observadas nos edifícios de alojamento um fator de variação a considerar [1].

Os suínos, sendo animais homeotérmicos, requerem ambientes dentro de uma faixa de temperatura, designada por zona de conforto térmico ou termoneutralidade, na qual conseguem regular a sua temperatura corporal sem despender energia adicional. Esta faixa de temperatura varia de acordo com a fase fisiológica dos animais, mais especificamente, a sua idade [2]. A humidade relativa do ar, no interior dos edifícios de alojamento, deve manter-se idealmente abaixo dos 70%, uma vez que influencia de forma significativa (positiva ou negativa) a dissipação de calor pelos suínos, nomeadamente através da evaporação [3]. O controlo da temperatura e da humidade relativa no ambiente interno dos edifícios é, portanto, essencial para garantir tanto o bem-estar animal quanto o desempenho produtivo, devendo estar de acordo com as recomendações técnicas para a fase fisiológica de produção [4]. O principal desafio da suinicultura intensiva reside na adequação do ambiente interno dos edifícios de alojamento dos animais às variações climáticas das regiões de produção. Alterações nos parâmetros ambientais podem comprometer a homeostase dos animais, provocando stress térmico (por calor ou frio) e levando à necessidade de maior despesa energética, o que vai refletir negativamente nos indicadores zootécnicos de desempenho e, consequentemente, a uma maior perda económica [4,5]. A exposição contínua dos animais a condições subótimas agrava ainda mais o quadro referido anteriormente, considerando que os suínos são frequentemente criados em ambientes com elevadas concentrações de gases [por exemplo, dióxido de carbono (CO_2) e NH_3], poeiras e ruídos, que muitas vezes ultrapassam os limites aceitáveis para garantir o conforto e a saúde animal [5]. O metabolismo dos animais contribui diretamente para a qualidade do ar no interior dos edifícios de alojamento instalações, através da libertação de calor, vapor de água e CO_2 resultantes da sua respiração [6]. Entre os principais gases emitidos, como referido anteriormente, destaca-se o NH_3, resultante da decomposição biológica dos chorumes, cuja volatilização depende da temperatura, do pH e da velocidade do ar. O CO_2, por sua vez, pode apresentar concentrações variáveis consoante com o tipo de construção, a ventilação, a gestão dos chorumes produzidos e o funcionamento das cortinas [1,7]. A renovação do ar no interior dos edifícios de alojamento é crucial, não apenas para o conforto térmico, mas também para remover partículas em suspensão e reduzir a concentração de gases prejudiciais [7]. Estudos desenvolvidos em suínos, na fase fisiológica de crescimento-terminação, demonstraram que a ventilação natural está associada a piores condições ambientais, nomeadamente maiores concentrações de CO_2 e NH_3, quando comparada à ventilação mecânica [7,8]. Convém ressaltar que a faixa temperatura ambiente ideal para suínos na fase fisiológica de

crescimento-terminação situa-se entre 24°C e 16°C [9,10]. Os resultados de um estudo, onde foi avaliado o impacto de diferentes sistemas de controlo ambiental (ventilação forçada, arrefecimento evaporativo adiabático e ausência de climatização) nos indicadores zootécnicos de desempenho produtivo dos animais, mostraram melhores performances zootécnicas em condições em que foi possível controlar eficazmente o ambiente térmico, nomeadamente com recurso ao sistema evaporativo [5].

A emissão de GEE na produção suinícola como o CO_2, o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), tal como referido anteriormente, gera preocupações ambientais relevantes [1]. O NH_3, embora não seja classificado como um GEE, tem impacto na qualidade ambiental e no bem-estar dos suínos justificando, igualmente, o seu controlo e avaliação. A maior parte dos métodos disponíveis atualmente para quantificar estas emissões foram desenvolvidos entre as décadas de 80 e 90 do século XX [1], sendo amplamente reconhecidas tanto pela comunidade académica quanto pela científica, as dificuldades associadas à sua aplicação em edifícios de alojamento com ventilação natural, devido à dificuldade em calcular com precisão os fluxos de ar [1,11,12]. Os inventários de emissões publicados apresentam, frequentemente, níveis elevados de incerteza relativamente às emissões gasosas oriundas da atividade pecuária. Este cenário reforça a necessidade do desenvolvimento e padronização de metodologias de referência para a medição das emissões gasosas, podendo estas diferenciarem-se pelo número e diversidade de medições, pela sua duração e pela continuidade ao longo do tempo [1,12]. Neste contexto, têm sido conduzidos vários estudos com o objetivo de desenvolver e aprimorar técnicas de medição e estabelecer fatores de emissão mais representativos da realidade [1,6,13,12,14,16]. A metodologia baseada em medições contínuas aliada aos balanços de massa, de água e nutrientes tem sido amplamente reconhecida como padrão de referência, por proporcionar muitas observações ao longo do tempo e permitir uma melhor caracterização sazonal das emissões [1,12,16]. Contudo, a sua aplicação à escala real, com recurso a muitos dados, é limitada pelos elevados custos operacionais associados.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a emissão de CO_2 e NH_3, comparando os resultados obtidos com recurso a duas metodologias distintas de quantificação destas emissões, na fase fisiológica de crescimento-terminação em suínos: (1) o balanço de massa, e (2) fluxo de gás.

2. Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido entre janeiro de 2022 e julho de 2023, no sistema experimental de produção de suínos da Embrapa Suínos e Aves, no município de

Concórdia, Estado de Santa Catarina (Brasil) (Latitude: 27°18'49" S; Longitude: 51°59'34" W; Altitude: 546 m). No total, foram avaliados 300 suínos na fase fisiológica de crescimento-terminação, com idade inicial de 68 dias e genética Large White (machos e fêmeas), ao longo de três ciclos de produção, com duração média de 102 dias cada. Uma sala de produção com 20 baias [3,0 × 2,5 m (1,35 m²/suíno)], com 16,8 m de comprimento, 13,0 m de largura e 2,8 m de pé-direito, equipada com bebedouro tipo chupeta pendular e piso em cimento, semi-ripado, anteriormente com ventilação natural, foi adaptada para funcionar como sala climatizada (SClim). Para tal, foram instalados sistemas automatizados para o registo contínuo de temperatura (Munters Sensor Temperature), humidade relativa do ar (Munters RHS Humidity Sensor), concentração de CO_2 (Munters Rotem Sensor) e NH_3 (Dräger Sensor Polytron 300), velocidade do ar (TSI Model 8455-12; CR 1000/Campbell Scientific) e consumo de água pelos suínos (Hidrómetro Renova ¾"). A sala SClim foi equipada com isolamento térmico no forro, constituído por duas camadas de lona laminada de 190 g, separadas por plástico bolha com 6 mm de espessura, na cor azul. O controlo e automação do ambiente interno foi assegurado por um sistema Munters Rotem. O arrefecimento foi realizado por meio de placas evaporativas, enquanto o aquecimento se efetuou através de um turboaquecedor GFn 85 alimentado a gasóleo. O sistema de ventilação foi concebido para manter os suínos dentro da zona de conforto térmico ao longo do ciclo produtivo.

Em cada ciclo de produção foram monitorizadas e avaliadas as seguintes variáveis: número de animais alojados (suínos), idade dos suínos (inicial e final, dias), peso médio vivo inicial (PMVI, kg), intermédio (a cada 21 dias) e final (PMVF, kg), consumo médio diário de ração (CMDR, kg/dia), ganho de peso médio diário (GPD, kg/dia), conversão alimentar (CA), consumo de água diário (L/dia), produção de chorume diário (L/dia), concentração de gases (interno e externo), temperaturas (interna e externa, °C), humidade relativa do ar (interna e externa, %) e a velocidade do ar (m/s), no verão e inverno, de modo a caracterizar as condições ambientais da sala SClim.

O consumo de ração foi calculado pela diferença entre a quantidade diária de dieta fornecida por baia e as sobras, registadas e pesadas na manhã do dia seguinte. As rações disponibilizadas foram do tipo padrão Embrapa, para a fase fisiológica de crescimento-terminação, com correções nos níveis de proteína bruta, aminoácidos digestíveis, energia metabolizável, cálcio e fósforo, considerando três faixas de peso (30–60 kg; 60–90 kg; 90–115 kg), conforme as Tabelas Brasileiras de Nutrição de Aves e Suínos [17]. No decorrer de cada ciclo de produção foram realizadas 10 amostras da ração disponibilizada (total de 30 amostras no estudo), tendo sido analisado matéria seca (MS), matéria mineral (MM), carbono total (CT), azoto total (NT) e fósforo total (PT).

A análise físico-química do chorume produzido foi realizada a 10 amostras recolhidas, por lote (total de 30 amostras no estudo), e incluiu: sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos fixos (SF), carbono total (CT), azoto total (NT), fósforo total (PT) e potássio (K).

Para aferição dos sensores de concentração de gases (NH_3 e CO_2), utilizou-se o analisador INNOVA 1412 (Photoacoustic Field Gas Monitor). As velocidades do ar (m/s) foram registadas a partir de sensores instalados a 1,5 m de altura no centro da sala, e a área de entrada de ar foi considerada com base nas dimensões das placas evaporativas (m2), conforme metodologia descrita na literatura [1,12].

Atualmente, um dos principais métodos utilizados para a caracterização das emissões de gases consiste no cálculo do produto entre a diferença de concentrações dos gases no ar (interno e externo) e a taxa de ventilação [1,12,18]. Para o cálculo das emissões de CO_2, por exemplo, considera-se o caudal de ar exalado da edificação, as características psicrométricas da massa volúmica do ar e a diferença de concentrações do gás entre o interior e o exterior do edifício de alojamento dos suínos, expressa em concentração mássica de carbono [Equação (1)].

$$\phi = Q_{ar} \times \rho_i \times (C_i^m - C_e^m) \quad (1)$$

onde:

ϕ - fluxo de gás (ex: mg C-CO_2/h/suíno)

Q_{ar} – caudal de ar no edifício de alojamento

(C_i^m - C_e^m) - diferença das concentrações de gases entre o interior e exterior a edificação

ρ_i - fator de correção do caudal de ar (m³ para kg de ar seco/h), que pode ser calculado através da Equação (2).

$$\rho_i = \left[\frac{P_{vap}}{47,1 \cdot (T_{ref} + t_i)} + \frac{P_{atm} - P_{vap}}{29,27 \cdot (T_{ref} + t_i)} \right] \cdot \frac{1}{grav} \quad (2)$$

onde:

P_{vap} – pressão parcial de vapor de água (razão de mistura)

47,1 e 29,27 – constantes dos gases perfeitos para o vapor de água e ar seco, respetivamente

grav – aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

T_{ref} – temperatura do ponto crítico da água (273,15 K)

O método do balanço de massa por "défault" permite estimar as perdas de água, carbono, azoto sob forma gasosa, sem necessidade de discriminar a importância relativa de cada espécie química (ex.: C-CO_2, C-CH_4, N-N_2O, N-N_2, N-NH_3)

[1,12,16,18]. As emissões de CO_2 e NH_3 foram calculadas com base nos princípios referidos em [1,11,12,16,18], ou seja, através das relações de concentração. As hipóteses assumidas neste método possibilitam verificar se as quantidades de elementos analisados nos "inputs" e "outputs" são representativas para a fase de produção estudada. O método das relações de concentração permite distribuir as perdas gasosas totais a partir do "défault" do balanço de massa do carbono e das concentrações medidas na sala SClim. Assim, com base no "défault" do balanço do carbono, na hipótese assumida na Equação (3), e nas concentrações de gás obtidas na sala SClim, foi possível estimar as emissões de CO2, CH4, N2O, NH3 e H2O, considerando o carbono [Equações (4) e (5)] e azoto [Equações (6) e (7)].

$$\text{Perdas}_{C} = \text{Emissão}_{C\text{-}CO2} + \text{Emissão}_{C\text{-}CH4} \quad (3)$$

$$\text{Emissão}_{C\text{-}CO2} = \text{Perdas}_{C} / \left[1 + \left(\overline{G}_{C\text{-}CH4} / \overline{G}_{C\text{-}CO2}\right)\right] \quad (4)$$

$$\text{Emissão}_{C\text{-}CH4} = \text{Emissão}_{C\text{-}CO2} \cdot \left(\overline{G}_{C\text{-}CH4} / \overline{G}_{C\text{-}CO2}\right) \quad (5)$$

$$\text{Emissão}_{N\text{-}NH3} = \text{Emissão}_{C\text{-}CO2} \cdot \left(\overline{G}_{N\text{-}NH3} / \overline{G}_{C\text{-}CO2}\right) \quad (6)$$

$$\text{Emissão}_{N\text{-}N2O} = \text{Emissão}_{C\text{-}CO2} \cdot \left(\overline{G}_{N\text{-}N2O} / \overline{G}_{C\text{-}CO2}\right) \quad (7)$$

$$\text{Emissão}_{H2O} = \text{Emissão}_{C\text{-}CO2} \cdot \left(\overline{G}_{H2O} / \overline{G}_{C\text{-}CO2}\right) \quad (8)$$

onde:

Perdas_C: perdas de carbono (kg);

$\text{Emissão}_{C\text{-}CO2}$: emissão de carbono na forma CO_2 (kg);

$\text{Emissão}_{C\text{-}CH4}$: emissão de carbono na forma CH_4 (kg);

$\text{Emissão}_{N\text{-}NH3}$: emissão de azoto na forma NH_3 (g);

$\text{Emissão}_{N\text{-}N2O}$: emissão de azoto na forma N_2O (g);

Emissão_{H2O}: emissão de vapor de água (kg);

$\bar{G}_{CO2}$: gradiente médio de carbono na forma CO_2 (mg/kg ar seco);

$\bar{G}_{CH4}$: gradiente médio de carbono na forma CH_4 (mg/kg ar seco);

$\bar{G}_{NH3}$: gradiente médio de azoto na forma NH_3 (mg/kg ar seco);

$\bar{G}_{N2O}$: gradiente médio de azoto na forma N_2O (mg/kg ar seco);

$\bar{G}_{H2O}$: gradiente médio de vapor de água (mg/kg ar seco).

A análise estatística considerou os indicadores zootécnicos de desempenho (peso vivo, ganho de peso médio diário, conversão alimentar e consumo médio diário de ração), através da análise da variância de medidas repetidas e dias de alojamento, conforme descrito pelo processo GLM do SAS [19].

3. Resultados

Na Tabela 1 podem ser observados os valores médios obtidos no decorrer do estudo para as variáveis peso médio vivo final, ou seja, no abate (PMVF, kg), consumo diário de ração (kg/dia), ganho de peso médio diário (GPD, kg/dia), conversão alimentar (CA).

Tabela 1: Valores médios observados do peso médio vivo final, ou seja, no abate (PMVF, kg), do consumo médio diário de ração (CMDR, kg/dia), do ganho de peso médio diário (GPD, kg/dia) e da conversão alimentar (CA).

Ciclo	PMVF (kg)	CMDR (kg/ dia)	GPMD (kg/dia)	CA
1	111,5±1,88	2,40±0,81	0,92±0,02	2,58±0,02
2	113,1±2,31	2,38±0,87	0,89±0,02	2,71±0,04
3	124,5±2,07	2,51±0,83	0,96±0,02	2,64±0,04
Média	**116,4±7,07**	**2,43±0,82**	**0,92±0,01**	**2,65±0,02**

Nota: os valores apresentados correspondem a média e desvio padrão.

Os suínos, no começo do estudo realizado, apresentavam um peso médio vivo inicial (PMVI) de 26,16±0,62 kg. De acordo com a Tabela 1, e considerando todas as observações, o PMVF observado foi de 116,4±7,07 kg. No que diz respeito ao CMDR, GPMD e CA, os valores médios obtidos no decorrer de todo o estudo foram, respectivamente: 2,43±0,82 kg/dia, 0,92±0,01 kg/ dia e 2,65±0,02. A Tabela 2 exibe os valores médios da temperatura e humidade relativa do ar (interna e externa à sala SClim).

Tabela 2: Valores médios, mínimos e máximos da temperatura (°C), no ambiente interno e externo à sala SClim.

	Temperatura SClim (°C)			Temperatura Externa (°C)			Humidade Relativa do ar (%)	
Ciclo	**Med±DP**	**Mín.**	**Máx.**	**Med±DP**	**Mín.**	**Máx.**	**Interna**	**Externa**
1	22,2±2,1	12,1	29,4	23,1±3,2	9,0	35,9	86,4±4,3	77,2±6,1
2	19,1±1,1	10,8	24,5	15,9±1,5	4,0	31,0	85,2±3,1	80,2±5,5
3	22,3±1,8	17,8	26,6	23,5±2,5	15,0	37,0	90,4±4,1	78,3±3,5
Média	**21,8±1,2**	**12,3**	**25,8**	**20,8±7,3**	**8,1**	**33,9**	**87,3±11,5**	**83,9±9,4**

Nota: Med±DP: Média±Desvio-padrão; Mín.: Mínimas; Máx.: Máximas.

A temperatura média registada de janeiro de 2022 a julho de 2023, no decorrer dos três ciclos de produção avaliados, foi de 21,8±1,2 °C; a humidade relativa média observada foi de 87,3±11,5%. No ambiente exterior, a temperatura média observada foi de 20,8±7,3 °C e a humidade relativa média foi de 83,9±9,4%. Ainda de acordo com os dados apresentados na Tabela 2, as temperaturas médias das mínimas registadas na sala SClim foram de 12,3 °C, enquanto a média das máximas foi de 25,8 °C. No exterior, a temperatura média das máximas foi de 33,9 °C e a média das mínimas foi de 8,1 °C. A Tabela 3 mostra os valores médios da velocidade do ar (m/s) e do caudal de ar (m3/h/suíno) na sala SClim.

Tabela 3: Valores médios da velocidade do ar (m/s) e do caudal de ar (m^3/h/suíno), na sala SClim.

Ciclo	Méd±σ*	Média_Máx.	Média_Mín.	Caudal±σ*
1	0,22±0,03	0,45	0,05	242,02±35,91
2	0,19±0,02	1,97	0,09	214,70±30,86
3	0,21±0,19	0,44	0,07	249,81±19,33
Média	**0,21±0,02**	**0,95**	**0,07**	**235,84±28,70**

Nota: Caudal±σ*: Caudal do ar e desvio padrão, calculado com o uso da velocidade média do ar (Méd)

A velocidade média do ar observada na sala SClim foi de 0,21 m/s, com valores máximos e mínimos de 0,95 m/s e 0,07 m/s, respetivamente. A velocidade do ar manteve-se dentro da faixa recomendada para suínos na fase fisiológica de crescimento-terminação, cuja velocidade máxima aconselhada é, especificamente, de 0,40 m/s na fase de crescimento e de 1,0 m/s na fase de terminação [3]. Os resultados obtidos mostraram que o caudal médio de renovação do ar na sala, se situou acima dos valores recomendados, que estabelece um máximo de 180 m³/h/suíno para esta fase fisiológica produtiva [3], mas próxima de 204 m³/h/suíno, valor recomendado para a fase fisiológica da terminação [20]. A Tabela 4 apresenta os valores médios observados das concentrações de gases, no interior da sala SClim. Os valores determinados apresentaram concentrações médias de CO2 e NH3, respectivamente, de 644,7±72,4 ppm e 9,63±2,53 NH3 ppm.

Tabela 4: Valores médios observados das concentrações internas de dióxido de carbono (CO_2) e amoníaco (NH_3).

Ciclo	NH_3 (ppm)	CO_2 (ppm)
1	8,45±2,55	555,9±44,2
2	15,70±2,75	809,7±73,9
3	4,74±2,29	572,5±99,2
Média	9,63±2,53	644,7±72,4

Nota: os valores apresentados correspondem a média e desvio padrão.

Na Tabela 5 podem ser visualizados os valores médios das emissões de gases estimadas na sala SClim, com base nas relações de concentração através do método do balanço de massa por "défault": 2,23±0,95 kg/suíno/dia para o CO_2 e 2,25±0,97 g/suíno/dia para o NH_3. Observa-se ainda que a média do fluxo de gases, estimado a partir da diferença de concentrações entre o ambiente interno e externo e da velocidade do ar na sala, foi de 1,14±0,13 kg/suíno/dia para o CO_2 e de 3,61±0,38 g/suíno/dia para o NH_3.

Tabela 5: Emissões de gases (CO_2 e NH_3) pelos métodos balanço de massa e fluxo de gás, na fase fisiológica de crescimento-terminação, em sala climatizada (SClim).

Parâmetros		Emissão Gás (balanço massa)[1]				Fluxo de Gás (Velocidade Ar)[2]					
		Média	σ	Máx.	Mín.	Média	σ	Máx.	σ	Mín.	σ
CO_2	Kg/suíno/dia	2,23	0,95	3,72	1,01	1,47	0,67	2,86	1,09	0,63	0,32
NH_3	g/suíno/dia	2,25	0,97	5,23	0,79	4,68	0,35	7,75	2,74	1,82	1,46

Nota: σ: ±Desvio-padrão; [1]Metodo: balanço de massa; [2]Metodo: Fluxo de gás: média, média das máx., média das mín..

4. Discussão

Na Tabela 1 observou-se que não houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre ciclos de produção, no que diz respeito ao PMVF dos suínos produzidos na sala SClim, embora no ciclo 3 se tenha observado um ganho de 13 kg/suíno superior ao ciclo 1. Tal diferença pode ser explicada pela duração de cada ciclo (Média estudo: 102 dias; ciclo 1: 98 dias; ciclo 2: 105 dias; ciclo 3: 103 dias). Os PMVF obtidos no presente estudo estão em conformidade com os resultados disponibilizados na literatura, correspondentes à mesma fase fisiológica de crescimento-terminação [2,3,5,7,9,15,16,21,22]. O CMDR, o GPMD e a CA também não diferiram significativamente entre os três ciclos avaliados e monitorizados ($p \leq 0,05$; Tabela 1). Estes resultados corroboram outros disponíveis na literatura que igualmente não observaram diferenças no consumo de ração dos suínos em função do incremento térmico [23,24]. Adicionalmente, deve ser salientado que os valores obtidos para os indicadores zootécnicos de desempenho nesta fase estão alinhados com os reportados na literatura [5,9,15,23,24].

A observação da Tabela 2 permite observar que o valor médio das temperaturas observadas na sala SClim foi de 21,8 °C, sendo que as amplitudes térmicas entre os valores máximos e mínimos registados nos diferentes ciclos foram significativamente diferentes ($p>0,05$). No ciclo 1, a amplitude térmica foi de 17,3 °C; no ciclo 2 de 13,7 °C, e no ciclo 3 de 8,8 °C. Já no que se refere ao ambiente externo à sala SClim, as amplitudes foram ainda mais acentuadas: 26,9 °C no ciclo 1; 27,0 °C no ciclo 2 e 22,0 °C no ciclo 3.

Convém referir que os valores observados nas amplitudes térmicas, tal como referido anteriormente, refletem-se diretamente nas variações da velocidade média do ar registadas na sala SClim e presentes na Tabela 3, sendo que os valores obtidos influenciaram os resultados obtidos nos diferentes ciclos. A menor velocidade média do ar determinada durante o estudo foi obtida no ciclo 2 (0,187 m/s), embora neste ciclo de produção tenham sido registadas maiores amplitudes entre as velocidades máximas e mínimas (1,780 m/s).

Os valores mais elevados nas concentrações de CO_2 e NH_3 presentes na Tabela 4, foi para o ciclo 2, quando comparadas aos demais ciclos, permite indicar que estes podem estar relacionados com as variações das velocidades médias do ar, tal como exibido na Tabela 3. Embora as concentrações se tenham mantidas dentro das faixas recomendadas na literatura para a produção de suínos [3,12,25], estas incidem diretamente nos valores de fluxo de gás observados, uma vez que a velocidade do ar no interior do edifício de alojamento dos animais é uma variável determinante para o cálculo das emissões pelo método do fluxo de gases. A concentração de NH_3 em sistemas de produção de suínos não deve ultrapassar 25 ppm para humanos e 50 ppm para os animais, enquanto para o CO_2 o limite é de 3000 ppm [25], embora algumas referências disponíveis recomendem um valor inferior, de 1500 ppm [1,2]. Na Tabela 4 é possível observar que as médias das concentrações de NH_3 e de CO_2 se mantiveram abaixo dos limites recomendados, não se verificando, portanto, efeitos negativos sobre a saúde dos suínos. A monitorização dos indicadores zootécnicos de desempenho, temperatura, humidade relativa e velocidade do ar é fundamental para validar a representatividade das emissões de gases associadas ao processo produtivo.

Na Tabela 5 onde podem ser observadas as estimativas das emissões de CO_2 e NH_3 na sala SClim, com recurso de dois métodos diferentes, convém salientar que foram registadas diferenças significativas entre os valores médios das emissões (relação das concentrações através do método do balanço de massa por “défault” e do método do fluxo de ar). No caso do CO_2, o valor obtido pelo método do balanço de massa foi de 2,23±0,95 kg/suíno/dia, enquanto o fluxo de gás indicou 1,14±0,13 kg/suíno/dia. Esta diferença pode ser atribuída às variações da velocidade do ar no interior da sala SClim, que influencia diretamente o cálculo das emissões: quanto maior a velocidade do ar, maior o valor da emissão estimada. Quando se utilizam as velocidades médias das máximas observadas, os valores de emissão calculados pelo método de fluxo de ar não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) dos obtidos pelo método do balanço de massa (Tabela 5). Contudo, ao utilizar as velocidades médias das mínimas observadas, verifica-se uma subestimação do fluxo de gases em relação ao balanço de massa.

Os resultados observados, ao serem comparados independentemente, mostram valores semelhantes aos reportados em outros estudos. Porém, quando comparados no mesmo ambiente produtivo, utilizando ambas as metodologias, são significativamente diferentes. Surge, assim, a questão: qual o método mais adequado para calcular as emissões de gases: o balanço de massa ou fluxo de ar? Ficou evidente que, no caso da metodologia baseada no fluxo de ar, a precisão na medição da velocidade do ar é determinante. Quanto mais exatas forem as medições, mais próximo estará o valor obtido daquele determinado pelo balanço de massa. Assim, pode ser considerado que ambas as metodologias podem ser utilizadas de forma complementar na gestão das emissões de GEE e NH3 na produção suinícola, especialmente considerando os custos associados. O método de balanço de massa é adequado para definir faixas de emissão aceitáveis, para um conjunto de unidades de produção de determinada fase fisiológica, permitindo depois que a metodologia de fluxo de ar seja aplicada nas demais, assegurando que os resultados se mantenham dentro da faixa estabelecida pelo primeiro.

É importante considerar os custos do método a ser escolhido: o balanço de massa exige medições regulares das concentrações de gases no interior e exterior, amostragens e análises laboratoriais físico-químicas de ração e chorumes líquidos produzidos, além de algoritmos de cálculo mais complexos. Acresce a dificuldade de conhecer exatamente a retenção dos elementos C e N pelos suínos, frequentemente estimados com base na literatura, e que podem influenciar os resultados a considerar. Com o avanço das tecnologias de informação (TI), inteligência artificial (IA) e a adoção crescente de sistemas automatizados e de monitorização em tempo real, a aplicação da metodologia do balanço de massa em larga escala torna-se menos prática. Assim, a metodologia baseada no fluxo de gás é mais simples e viável, utilizando sensores disponíveis comercialmente (termómetros, anemómetros, medidores de CO_2 e NH_3) e permitindo a integração em sistemas automatizados para a estimativa contínua das emissões. Esta abordagem favorece não só a monitorização em tempo real das emissões, como também a gestão eficiente das unidades de produção de suínos.

5. Conclusão

A monitorização e o controlo em tempo real dos parâmetros ambientais e das concentrações de gases em edificações destinadas à produção de suínos, durante a fase fisiológica de crescimento-terminação, revelam-se fundamentais para a estimativa precisa das emissões de CO_2 e NH_3.

Na escolha da metodologia mais adequada para essa estimativa, é essencial ponderar os custos envolvidos, a precisão na medição da velocidade do ar e o

objetivo final do estudo. Embora o método do balanço de massa apresente maior rigor nos resultados, a metodologia baseada no fluxo de gás constitui uma alternativa viável para a monitorização de um número elevado de explorações suinícolas, desde que assegurada a exatidão na medição da velocidade do ar. Assim, a decisão pela metodologia a adoptar deve equilibrar a necessidade de precisão com a viabilidade prática e económica da sua aplicação.

6. Referências

1. Hassouna M, Eglin T, Cellier P, Colomb V, Cohan J-P. Mesurer les émissions gazeuses en élevage: gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote. INRA-ADEME (Paris-France), 2015, 314 p., ISBN: 2-7380-1375-9. Hal-01590618
2. Oliveira, P.A.V. de. Comparaison des systèmes d'élevage des porcs sur litière de sciure ou caillebotis integral. Thèse (Docteur) - L'ENSAR, Université de Rennes, Rennes-FR, 1999. 272 p.
3. IFIP. Mémento de l`éleveur de proc, 7ème éd.; Institut du Porc (IFIP): 5, rue Lespagnol, 75.020, Paris, 2013. p. 51-57.
4. Oliveira, P. A. V. de; Coldebella, A.; Tavares, J. M. R. A ambiência das edificações para a produção de leitões. Anais... In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Campinas: SBEA, 49ed., 2020.
5. Bernabé, J.M.C; Pandora, H.; Gomes, N. F..; Holanda, M.A.C; Holanda, M.C.R; Carvalho Filho, J.L.S. Performance of growing pigs subjected to lighting programs in climate-controlled environments. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.24, p.616-621, 2020. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p616-621.
6. Dourmad, Jean-Yves; Pomar, Candido; Massé, Daniel. Modélisation du flux de composés à risque pour l'environnement dans un élevage porcin. Journeés Recherche Porcine, 34., Paris, France, 2002. p. 183-194.
7. Nunes, E. H.; Pecoraro, C. A.; Gonçalves, J. C.; Miranda, K. O. da S.; Oliveira, P. A. V. de; Bumbieris Junior, V. H.; Tavares Filho, J. Methods for determining the emission of greenhouse gases in swine farming. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2023. v.27, n.3, p.195-201.
8. Oliveira, P. A. V. de; Coldebella, A.; Marcanzoni, V. C. B. Influência da climatização no ganho de peso dos suínos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, 7.: SEMINÁRIO TÉCNICO CIENTÍFICO DE AVES e SUÍNOS, 21., 2023, Medianeira, PR. Resumos... Medianeira: AVESUI América Latina, 2023. p. 76.
9. Quinioun, N.; Massabie, P.; Granier, R. Diurnally variation of ambient temperature around 24 or 28º: Influence on performance and feeding behavior of growing pigs. In: Proceedings of the 1st International Conference, Iowa, Swine Housing, 2000. p. 332-339.
10. Rigolot, C.; Espgnol, S.; Robin, P.; Béline, F.; Paillat, J.M. Modelling of manure production by pigs and NH3, N2O and CH4 emissions – Part II: Effect of animal housing, manure storage and treatment practices. Animal Cambridge Journals, Cambridge, v. 35, n. 738, p. 1413-1424, Aug. 2010.
11. Paillat, J.M.P.; Robin, M.; Hassouna, J.C.; Toularastel, P. Environmental assessment of composting pig slurry with wheat straw based on the Guernévez process. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON GREEN PORK PRODUCTION, 2, 2005, Paris. Proceedings... Paris: Guernévez® Process, 2005. p. 49-54.
12. Robin, Paul et al. Reference procedures for the measurement of gaseous emissions from livestock houses and storages of animal manure. Final Report, ADEME, Paris-FR, april, 2010. 260 p. (Contrat N. 0674C0018).
13. Dore, C.J.; Jones, B.M.R.; Scholtens, R.; Veld, J.W.H.H.I.T.; Burgess, L.R.; Phillps V.R. Measuring ammonia emission rates from livestock buildings and manure stores, part 2: Comparative demonstrations of three methods on the farm. Atmospheric Environment, Ottawa, 2004. v. 38, n. 19, p. 3017-3024.
14. Phillips, V.R.; Lee, D.S.; Scholtens, R.; Garland, J.A.; Sneath, R.W. A review of methods for measuring emission rates of ammonia from livestock buildings and slurry or manure stores. Part 2: monitoring flux rates, concentrations and airflow rates. Journal of Agricultural Engineering Research, Nottingham, v. 78, n. 1, p. 1-14, 2001.

15. Guingand, N.; Quinioun, N.; Courboulav, V.. Emissions comparées d'ammoniac et de gáz à effect de serre par des porcs charcutiers élevés au froid ser aillebotis partiel ou à la thermoneutralité sur caillebotis integral. Journeés Recherche Porcine, 42ème éd.; Institut du Porc (IFIP): 5, rue Lespagnol, 75.020, Paris, 2010. pp. 277- 283.
16. Tavares, J. M. R. Modelagem do consumo de água, produção de dejetos e emissão de gases de efeito estufa e amônia na suinocultura. Tese, UFSC, Centro Tencológico, Florianópolis-SC, 2016. p. 229.
17. Rostagno, H. S. (Ed.), Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais. 2017, 4ª ed., Universidade Federal de Viçosa-UFV, Viçosa. 488p.
18. Robin, P.; Hassouna, M.; Leleu, C.; Ramonet, Y.; Paillat, J.-M. Protocole de mesure simplifiée des émissuons gazeuses en élevage. UMR Sol Agronomie Spatialisation/INRA.Rennes, 2006. 22 p.
19. SAS INSTITUTE INC. System for Microsoft Windows, Release 9.4, Cary, NC, USA, 2002-2012.
20. Harmon, J.D.; M. Hanna; D. Petersen. 2010. Sizing minimum ventilation to save heating energy in swine housing. PM 2089J. Iowa State University Extension and Outreach, Ames, Iowa. Hhttps://store.extension.iastate.edu/product/13404.
21. Oliveira, P. A. V. de; Belli Filho, P.; Turmina, L.; Coldebella, A.; Tavares, J. M. R. Modélisation du volume et de la composition du lisier des porcs à l`engraissement. Journeés Recherche Porcine, 47ème éd.; Institut du Porc (IFIP): 5, rue Lespagnol, 75.020, Paris-FR, 2015. p.153-158.
22. Kiefer, C.; Moura, M.S.; Santos, A.P.; Silva, C.M.; Luz, M.F.; Nantes, C.L. Respostas de suínos em terminação mantidos em diferentes ambientes térmicos. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, Olinda, 2010. v. 11, n. 2, p. 496-504.
23. Prekel, L.; Maes, D.;Van, B.A.; Aluwé, M. Evaluation of a heating protocol and stocking density impact on heatstressed fattening pigs. Animal. Volume 18, Issue 6. 101172. ISSN 1751-7311. https://doi.org/10.1016/j.animal. 2024.
24. Li, H.; Rong L.; Zhang, G. Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. Computers and Electronics in Agriculture. Volume 149. Pages 90-100. ISSN 0168-1699. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.013. 2018.
25. CIGR. 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and Moisture Production at Animal and House Levels. In: Pedersen, Søren; SÄLLVIK, K. (Eds.). Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences: Horsens, Denmark, 2002. 46p.

produzidos em ambiente climatizado e não climatizado, nas fases de crescimento e terminação no Brasil

Victoria C. B. Marcanzoni[1], Arlei Coldebella[2] e Paulo Armando V. de Oliveira[3,*]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Chapecó/SC, Brasil; victoriabonassi@gmail.com

[2] Embrapa Suínos e Aves, Caixa Postal 21, 89.700-000 Concórdia/SC, Brasil; arlei.coldebella@embrapa.br

[3] Embrapa Suínos e Aves, Caixa Postal 21, 89.700-000 Concórdia/SC, Brasil; paulo.armando@embrapa.br

* Correspondente: paulo.armando@embrapa.br; Tel.: (+55) 49999118193

Resumo: O principal desafio da suinocultura brasileira é adequar a ambiência interna das instalações frente às variações climáticas existentes, as quais possuem grande influência no desempenho produtivo, além de influenciar no bem-estar dos animais. O objetivo do trabalho foi verificar o impacto da ambiência, do conforto térmico e da concentração de gases sobre o comportamento e desempenho produtivo de suínos, nas fases de crescimento e terminação. O experimento foi realizado em duas etapas, de jun a set de 2022 (inverno) e de out de 2022 a fev de 2023 (verão). Foram registradas e analisadas continuamente variáveis do ambiente térmico, desempenho e avaliação comportamental, por imagens. Os tratamentos foram: sala não climatizada, com ventilação natural, (SNClim) e sala climatizada (SClim), ventilação forçada, controle de temperatura, aquecimento, resfriamento do ar. Observou-se diferença (p≤0,05) entre os tratamentos nos períodos de inverno e verão, sendo o ganho de peso de 41 g/dia no inverno de 60 g/dia no verão. As concentrações de CO_2 (ppm), foram semelhantes entre os tratamentos, nos períodos estudados. Houve diferença das concentrações de NH_3 entre as salas (SClim e SNClim), tanto no inverno como no verão. A forma como os animais se deita foi afetada (p≤0,05) pelos tratamentos tanto no inverno quanto no verão, sendo que deitar em grupo apareceu mais SNClim do que SClim no inverno, ocorrendo o inverso no verão. Os comportamentos de agressão por comida ou água, empurrar, manipular a orelha e tentativa de montar foram afetadas (p≤0,05), sendo maiores na SNClim do que na SClim. A avaliação do comportamento dos suínos evidenciou que o sistema climatizado reduziu a ocorrência de comportamentos indicadores de problemas de bem-estar e estresse térmico.

Palavra Chave: Bem-estar; desempenho; climatização; comportamento; suínos.

1. Introdução

Na produção de suínos existe uma preocupação social crescente sobre as condições ambientais que os animais são submetidos. Estas preocupações têm levado os produtores a criar estratégias para proporcionar aos animais um ambiente de adequado, que leve em consideração as exigências da fase fisiológica, para que se tenha assim o melhor desempenho do animal [1]. Os suínos são animais homeotérmicos, portanto existe uma "faixa" de temperatura conhecida como zona de conforto ou termoneutralidade em que o animal mantém sua temperatura

interna, sem gasto extra de energia, condição que varia de acordo com a idade do animal [2]. Segundo [2], a umidade relativa do ar deve estar abaixo de 70%, pois ela contribui positiva ou negativa com os mecanismos de dissipação de calor por via evaporativa dos animais. Segundo [3], é necessário monitorar a temperatura e a umidade relativa do ar, no ambiente interno das instalações, mantendo-os na faixa de conforto de acordo com as recomendações técnicas. O grande desafio da suinocultura é adequar a ambiência interna das instalações em relação às variações climáticas existentes, as quais possuem grande influência no desempenho produtivo dos animais, podendo causar prejuízos econômicos [4]. Os animais submetidos a condições de estresse por calor ou frio acabam tendo gasto energético adicional para manterem a homeostase, impactando negativamente os parâmetros produtivos [5]. Suínos são criados em ambientes com elevados níveis de gases, ruídos e poeira, que as vezes ultrapassam os limites exigidos para a manutenção do conforto e saúde animal [5] e [6]. O metabolismo dos animais e pode interferir na qualidade do ar da instalação, visto que o processo libera calor, umidade e dióxido de carbono proveniente da respiração dos animais [7]. Os principais gases produzidos são o amoníaco (NH3), originada da degradação biológica dos resíduos, e sua volatilização ocorre devido à elevada temperatura, velocidade do ar e pH, e o dióxido de carbono (CO2), que se apresenta em maiores ou menores concentrações, dependendo do tipo de construção, manejo dos dejetos e o manejo das cortinas [6]. A renovação do ar nas edificações é importante pois proporciona condições de conforto térmico aos animais, manter a dissipação do calor, além de movimentar e eliminar as partículas de aerossóis suspensos no ar [8]. Trabalho desenvolvido por [9] na fase produtiva de terminação de suínos, comparando parâmetros ambientais, de desempenho, saúde e bem-estar criados em dois ambientes diferentes, com ventilação natural e ventilação mecânica, concluiu que o ambiente com ventilação natural apresentou pior conforto térmico e níveis mais elevados de CO2 e NH3. A emissão de gases é uma preocupação ambiental na produção de suínos [10]. Entre esses gases destacam-se principalmente o CH4, N2O e CO2, além do NH3, que dependendo da concentração pode ter efeito sobre a produção animal. A geração destes gases na suinocultura vem principalmente da respiração animal e do manejo dos dejetos animais. A faixa de temperatura ambiente considerada ótima para suínos na fase de crescimento e terminação situa-se entre 16 a 20°C, respectivamente [11]. Estudo realizado por [12] avaliaram o efeito de ambientes controlados (ventilação forçada, sistema adiabático evaporativo e sistema sem climatização) associados sobre o desempenho produtivo nos animais. Os autores concluíram que o melhor desempenho produtivo dos animais foram os submetidos ao controle das condições térmicas ambientais e ao resfriamento adiabático evaporativo. Em trabalho desenvolvido por [13] foi demonstrado que o aumento do estresse ocasiona alterações comportamentais em

suínos, que podem ser utilizados como indicadores de bem-estar. Estudos de [14] evidenciou que o comportamento de dominância na alimentação de suínos está relacionado com a atividade diurna e com o ambiente térmico. Em períodos de temperatura elevada, ocorre redução do tempo e consumo de alimentação [15]. Experimento conduzido por [16] comparando o comportamento de suínos submetidos a três diferentes sistemas de controle térmico (baias sem controle ambiental, com ventilação forçada e com sistema adiabático evaporativo), demonstrou que o sistema com resfriamento adiabático evaporativo foi eficiente em reduzir a temperatura e aumentar a umidade relativa, além de aumentar a frequência de atividades ingestivas e de comportamentos letárgicos, que são típicos da fase de terminação. Pesquisa desenvolvida por [17] usando o monitoramento de imagens para avaliar o comportamento de suínos na fase de crescimento e terminação, demostraram que sistemas de climatização associados a programas de iluminação suplementar têm efeito sobre o comportamento ingestivo dos suínos. Experimento realizado por [18], nas fases de crescimento e terminação, avaliando parâmetros fisiológicos, comportamentais e desempenhos dos suínos, demostraram que suínos em sistemas sem controle ambiental apresentam problemas comportamental, maior consumo alimentar diário e maior conversão alimentar. Objetivo do trabalho foi comparar o comportamento e o desempenho zootécnico de suínos, nas fases de crescimento e terminação, em dois ambientes diferentes, sendo um climatizado com controle da ambiência e outro na ambiência natural.

2. Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no município de Concórdia/SC, na unidade experimental de produção de suínos da Embrapa Suínos e Aves (Longitude 27º 18` 49`` S e Latitude 51º 59` 34`` W, altitude de 546 m), onde foram selecionadas duas salas de produção na fase fisiológica de crescimento e terminação de suínos. As salas eram idênticas nas características construtivas, comprimento de 16,8; largura 13,0 e pé-direito de 2,8 m, piso semi-ripado em concreto, com 20 baias por sala, com dimensão de 3,0 × 2,5 m equipadas com bebedouros tipo chupeta pendular, sendo usados 5 animais por baia (1,35 m2/animal). As duas salas foram equipadas com sistemas automatizados de registro das temperaturas (Munters Sensor Temperature), umidades relativas do ar (Munters RHS Humidity Sensor), medições da concentração de CO2 (Munters Rotem Sensor) e NH3 (Dräger Sensor Polytron C 300), velocidade do ar (TSI Model 8455-12; CR 1000/Campbell Scientific) e consumo da água pelos suínos (Hidrómetro Renova ¾”). O estudo foi conduzido em duas etapas, a primeira no período de inverno (junho a setembro de 2022, 101 dias) e, a segunda no período do verão (outubro de 2022 a fevereiro de 2023, 99 dias).

O experimento utilizou 400 suínos, sendo alojados para cada repetição 200 suínos da raça Large White (machos), 100 em cada sala experimental. Os animais foram alojados com idade média de 68 dias no inverno e 69 dias no verão. Neste trabalho foram avaliados dois tratamentos, assim descritos:

- Sala Climatizada (SClim): Sala com isolamento térmico do forro (2 camadas de lona laminada 190 g, separadas com plástico bolha na espessura de 6 mm, na cor azul), sistemas de controlo e automação para a ventilação, arrefecimento do ar interno por meio de placas evaporativas e aquecimento se efetuou por meio de um turbo aquecedor GFn 85 à gasóleo, com objetivo de manter os animais dentro da zona de conforto térmico.
- Sala não climatizada (SNClim): Sala onde o ambiente interno foi controlado manualmente com o fechamento ou abertura lateral de cortinas, sem a utilização de aquecimento ambiental. As cortinas e o forro utilizados eram de lonas laminadas 190 g (330 micras) na cor amarela.

Durante o experimento foram coletadas as seguintes variáveis de produção: número de suínos alojados, idade inicial e final, peso médio vivo inicial (PMVI, kg), intermediários (a cada 21 dias de alojamento) e final (PMVF, kg), consumo diário de ração, GPD (Ganho Peso Diário), CA (Conversão Alimentar). O consumo diário de ração pelos suínos era estimado por meio da pesagem diária da quantidade fornecida de ração por baia e das sobras de ração, pesadas no período da manhã do dia seguinte. Na análise do comportamento animal foi utilizada a metodologia proposta por [19], com filmagens diárias continuas semanais, na quarta-feira, no sábado e domingo. Estes dias foram escolhidos por serem de menor interferência externa, pela rotina de trabalho da granja. As filmagens foram realizadas por um período de 24 horas ininterruptas, totalizando 42 dias de cada período experimental. Em cada sala foram escolhidas aleatoriamente 4 baias (5 suínos/baia) espalhadas ao longo da sala e instaladas 4 câmeras para avaliar o comportamento animal em cada baia. Nestas baias os suínos eram todos machos uma vez que machos possuem maior reatividade ao ambiente [20].

As observações e registro do comportamento foram realizadas por 10 minutos seguidos, a cada hora, ao longo dos períodos de 24 horas. Foram realizados dois tipos de avaliação comportamental: **1) Amostragem instantânea por varredura:** no período de 24 horas, o comportamento dos animais foi registrado a cada 30 minutos. No instante de tempo de avaliação, era caracterizado o comportamento de cada animal e em função deste, era selecionado qual descrição comportamental melhor se encaixava dentro do etograma de trabalho utilizado. Nesta metodologia, foram gerados 48 registros comportamentais por dia, para cada um dos 42 dias avaliados, totalizando 2.016 registros; **2) Amostragem contínua:** no período de 24 horas, a cada 1 hora, foram utilizados 2 minutos contínuos para registro de todas as ocorrências dos comportamentos de interesse, descritos no etograma de

trabalho. Foram utilizados 24 períodos de 2 minutos contínuos por dia, no total de 42 dias avaliados, totalizando 1.008 horas de vídeo e 33,6 horas de avaliação ou 2.016 minutos.

O etograma de trabalho para avaliação comportamental para **1) Amostragem instantânea por varredura: a) Atividade Física:** Em pé, Andar e Correr; **b) Inatividade:** Deitado lateralmente, ventralmente, em grupo e sentado; **c) Interação com o ambiente:** Interação com a baia, comportamento de contato, comportamento sexual (monta) e para **2) Amostragem contínua: a) Interação social:** Cheirando, empurrando, manipulando a cauda, manipulando a orelha; **2) Comportamento Agressivo:** Agressão por água/alimento, luta; **3) Comportamento sexual:** Tentativa de montagem e montaria por 2 segundos. Na análise estatística foi avaliado o efeito dos tratamentos sobre as variáveis de desempenho produtivo (peso vivo, ganho de peso médio diário, conversão alimentar e consumo diário de ração), análise da variância de medidas repetidas, considerando os efeitos de tratamento, sexo, período (inverno e verão), dias de alojamento e interações pertinentes usando os procedimentos do SAS [21]. Para as variáveis de comportamento dos suínos foi aplicada a análise da variância para o modelo contendo os efeitos do período (inverno e verão), tratamento e a interação entre eles. As análises foram realizadas por meio do procedimento GLM do SAS [21].

3. Resultados

Na Tabela 1 são apresentados os valores das temperaturas do ar internas nos tratamentos (SClim e SNClim, °C), médias ajustadas e desvio-padrão, média das mínimas e das máximas, nos períodos de inverno e verão. Os valores de umidade relativa do ar (%) no inverno, foram de 85,13±6,12 para SClim e 85,06±5,89 para SNClim. No verão a umidade relativa do ar observada foi de 90,25±5,77 para SClim e 78,32±7,24 para SNClim.

Tabela 1 – Médias, desvios padrão (DP) e valores médios absolutos (mínimas e máximas) da temperatura do ar interna e externas nos tratamentos SClim e SNClim, nos períodos de inverno e verão.

Período	Temp. SClim (°C)			Temp. SNClim (°C)			Temp. externa (°C)		
	Méd. DP	Min	Máx	Méd. DP	Min	Máx	Méd. DP	Mín	Máx
Inverno	19,1±2	10	24	18,4±4	7	28	16,4±4	4	31
Verão	22,3±2	17	26	25,1±3	17	33	24,7±4	15	37

Nota: Temp.: Temperatura; Méd: Média; DP: Desvio-padrão; Min: Mínimas; Máx: Máximas.

A análise do desempenho produtivo entre os tratamentos, período e dias de alojamento é apresentado na Tabela 2. A climatização do ambiente teve efeito positivo no desempenho produtivo dos animais, sendo que o ganho de peso diário apresentou diferença maior do que 40 gramas por dia nos períodos analisados. A

conversão alimentar apresentou diferença significativa (p≤0,05) aos 64 (inverno) e 63 (verão) dias de alojamento, mas ao final do experimento, apesar de numericamente o resultado ser mais baixo na sala climatizada, não houve diferença significativa (p>0,05) em relação à sala não climatizada (Tabela 2).

Tabela 2 - Desempenho produtivo (média±erro padrão) de suínos na fase de crescimento e terminação, submetidos aos tratamentos SClim e SNClim, nos períodos de inverno e verão.

Parâmetros	Inverno				Verão		
	Dia	SClim	SNClim	Pr>F	Dia	SClim	SNClim	Pr>F
Peso (kg)	1	23,67±0,88	23,44±0,84	0,86	1	30,02±0,89	30,04±0,86	0,98
	64	73,99±1,81	70,95±1,63	0,19	63	85,62±1,56	83,21±1,69	0,27
	101	113,1±2,31	108,8±2,23	0,11	99	124,5±2,07	119,1±1,98	0,03
CMR (kg)	64	1,83±0,04	1,81±0,04	0,82	63	1,97±0,03	1,96±0,03	0,69
	101	2,39±0,06	2,31±0,05	0,19	99	2,51±0,04	2,39±0,04	0,03
GPD (kg)	64	0,786±0,02	0,742±0,01	0,04	63	0,88±0,02	0,84±0,02	0,04
	101	0,886±0,02	0,845±0,01	0,02	99	0,96±0,02	0,90±0,01	0,01
CA	64	2,33±0,04	2,45±0,03	0,01	63	2,24±0,02	2,32±0,029	0,02
	101	2,70±0,03	2,73±0,02	0,41	99	2,63±0,01	2,66±0,023	0,55

Nota: Peso: Peso vivo; CMR: Consumo de ração médio diário (kg/dia); GPD: Ganho de peso médio diário (kg/dia); CA: Conversão alimentar acumulada.

Na Tabela 2, observou-se que o peso vivo final dos suínos apresentou diferença entre os tratamentos no inverno de 4,3 kg e no verão 5,4 kg, por animal no final do período produtivo. Na CA, não se observou diferença significativa (p>0,05) entre os tratamentos para os períodos de inverno e verão. Porém, para o CMR e GPD, observou-se diferença significativa (p≤0,05) entre os tratamentos nos períodos de inverno e verão, sendo para o GPD de 41 g/dia no inverno e de 60 g/dia no verão. Para CMR a diferença entre os tratamentos foi de 80 g/dia no inverno e 120 g/dia no verão, sempre favoráveis para o tratamento SClim em comparação com SNClim.

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentados os valores das médias ajustadas, desvio-padrão, mínimas e máximas das variáveis de concentração de gases amoníaco (NH_3) e Dióxido de Carbono (CO_2) no interior das instalações, nos tratamentos (SClim e SNClim), nos períodos de inverno e verão.

Tabela 3 – Média seguida de desvio-padrão (DP) e média dos valores absolutos (mínimas e máximas), da concentração de CO_2 e NH_3 no ambiente interno no tratamento SClim.

Período	CO_2 (ppm_v)			NH_3 (ppm_v)		
	Média ± DP	Min.	Máx.	Média ± DP	Min.	Máx.
Inverno	773,44±191,26	320	1.181	16,89±7,81	2	32
Verão	515,12±93,32	314	931	3,24±2,07	2	26
Média	644,28±141,29	317	1.156	10,06±4,95	2	29

Nota: DP: Desvio-padrão; Min.: Mínimas; Máx.: Máximas.

As concentrações de CO_2 (ppm) observadas no inverno, foram de 773,44±191,26 para SClim e de 761,05±162,79 para SNClim. Para o verão foram de 515,12±93,32 para SClim e de 595,86±104,17 para SNClim. As concentrações de CO_2 foram semelhantes nos dois tratamentos avaliados, no inverno e verão. Porém, observou-se diferença das concentrações de NH_3 entre as salas (SClim e SNClim), tanto no inverno como no verão.

Tabela 4 - Média seguida de desvio-padrão (DP) e média dos valores absolutos (mínimas e máximas), da concentração

CO_2 e NH_3 no ambiente interno no tratamento SNClim.

Etapa	CO_2 (ppm_v)			NH_3 (ppm_v)		
	Média ± DP	Min.	Máx.	Média ± DP	Min.	Máx.
Inverno	761,05±162,79	405	1.291	12,70±5,16	2	32
Verão	595,86±104,17	399	894	7,67±2,31	3	18
Média	678,45±133,48	402	1.092	10,19±3,74	2	25

Nota: DP: Desvio-padrão; Min.: Mínimas; Máx.: Máximas.

As Tabelas 5, 6, 7 e 8 apresentam os comportamentos observados nos tratamentos SClim e SNClim, para os períodos de inverno e verão, sendo divididos nas fases de crescimento e terminação, mostrando a média seguida de desvio-padrão da frequência de comportamentos. O teste F da análise da variância detectou efeito significativo de tratamento, de período e da interação para a maioria das variáveis avaliadas.

Tabela 5 – Porcentagem (%) média seguida de erro padrão da frequência de comportamentos observados nas salas climatizada e não climatizada, nos períodos de inverno e verão, na avaliação por varredura na fase de crescimento.

Compor-tamento	Inverno - Salas			Verão - Salas		
	SClim	SNClim	Pr>F	SClim	SNClim	Pr>F
Andar	0,96±0,19	1,09±0,22	0,61	1,44±0,17	0,82±0,03	0,02
Bebendo	1,32±0,24	0,89±0,05	0,06	2,17±0,12	1,42±0,11	0,01
Comendo	11,33±0,59	10,26±0,39	0,16	9,24±0,03	7,91±0,18	<0,001
Contato	1,57±0,38	1,04±0,24	0,15	1,68±0,10	2,93±0,15	<0,001
Sexual	0,00±0,00	0,00±0,00	1,00	0,02±0,02	0,57±0,05	<0,001
Correr	0,05±0,05	0,31±0,18	0,19	0,088±0,03	0,17±0,02	0,04
D.G.	60,76±2,26	66,67±0,33	0,01	60,71±1,01	51,19±1,19	0,01
D.L.I.	6,25±0,59	1,09±0,10	0,01	6,13±0,39	19,78±0,62	<0,001
D.V.I	9,64±1,68	6,25±0,19	0,07	14,69±0,47	7,46±0,20	<0,001
Em pé	0,85±0,28	1,19±0,27	0,39	0,73±0,06	0,28±0,00	<0,001
I.B.	6,55±0,71	9,32±0,40	0,003	1,82±0,26	6,29±0,64	<0,001
Sentado	0,69±0,17	1,88±0,60	0,08	1,28±0,16	1,16±0,11	0,55

Nota: D.G.: Deitado em grupo; D.L.I.: Deitado lateralmente individualmente; D.V.I.: Deitado ventralmente individualmente; I.B.: Interação com a baia.

Para a fase de crescimento os comportamentos andar, bebendo, comendo, comportamento de contato, comportamento sexual, correr, deitado ventralmente e em pé apresentaram efeito significativo (p≤0,05) apenas no período de verão. A forma pela qual os animais deitam foi afetada significativamente (p≤0,05) pelos tratamentos tanto no inverno quanto no verão, sendo que deitar em grupo apareceu mais na sala não climatizada do que na sala climatizada no inverno, ocorrendo o inverso no verão. Para deitar lateralmente as ocorrências do comportamento foram maiores na sala climatizada no inverno e menores no verão, em comparação com a sala não climatizada.

Deitar ventralmente também teve ocorrências maiores na sala climatizada em relação a sala não climatizada no inverno. O comportamento de sentar, não teve efeito significativo (p>0,05) em nenhuma dos períodos (inverno e verão). Para a fase de terminação os comportamentos comendo, deitado em grupo, deitado ventralmente e interação com a baia apresentaram efeito significativo (p≤0,05) de tratamento apenas no verão. Andar, deitar lateralmente e sentar foram comportamentos afetados significativamente (p≤0,05) pelos tratamentos tanto no inverno quando no verão. Por outro lado, os comportamentos de beber, comportamento de contato, comportamento sexual, correr e em pé não tiveram efeito significativo (p>0,05) de tratamento em nenhuma das etapas estudadas (inverno e verão).

Tabela 6 – Porcentagem média seguida de erro padrão da frequência dos comportamentos estudados na avaliação por varredura, observados nas salas climatizada e não climatizada, nas etapas de inverno e verão na fase de terminação.

Compor-tamento	Inverno - Salas			Verão - Salas		
	SClim	SNClim	Pr>F	SClim	SNClim	Pr>F
Andar	0,60±0,09	0,19±0,04	0,001	1,19±0,02	0,69±0,07	<0,0001
Bebendo	1,01±0,11	1,36±0,15	0,12	2,42±0,14	2,04±0,17	0,09
Comendo	10,27±0,53	9,41±0,05	0,13	9,13±0,09	8,66±0,15	0,02
Contato	1,09±0,23	1,05±0,01	0,88	0,64±0,04	0,64±0,06	0,99
Sexual	0,00±0,00	0,00±0,00	1,00	0,00±0,00	0,23±0,04	0,38
Correr	0,02±0,01	0,05±0,01	0,09	0,00±0,00	0,06±0,02	0,89
D.G.	41,89±4,00	36,49±1,91	0,25	40,72±0,99	24,87±0,73	<0,0001
D.L.I.	18,93±0,60	27,11±0,97	<0,0001	15,27±1,61	49,31±0,49	<0,0001
D.V.I	18,66±3,20	16,56±0,70	0,53	27,57±1,14	6,81±0,39	<0,0001
Em pé	0,42±0,16	0,56±0,06	0,44	0,65±0,06	0,66±0,06	0,82
I.B.	5,93±0,50	6,38±0,14	0,40	1,10±0,02	5,25±0,16	<0,0001
Sentado	1,12±0,18	0,83±0,06	0,04	1,31±0,05	0,77±0,09	0,005

Nota: D.G.: Deitado em grupo; D.L.I.: Deitado lateralmente individualmente; D.V.I.: Deitado ventralmente individualmente; I.B.: Interação com a baia.

Para a fase de crescimento (Tabela 7) todos os comportamentos estudados apresentaram efeito significativo (p≤0,05) de tratamento somente no verão.

Tabela 7 - Média seguida de erro padrão da frequência diária dos comportamentos estudados na avaliação contínua, observados nas salas climatizada e não climatizada, nos períodos de inverno e verão, na fase de crescimento.

Comportamento	Inverno - Salas			Verão - Salas		
	SClim	SNClim	Pr>F	SClim	SNClim	Pr>F
A.C.A.	**1,17±0,42**	**2,37±0,58**	**0,12**	**0,41±0,04**	**0,92±0,06**	**<0,0001**
A/L	0,77±0,28	1,15±0,15	0,14	0,37±0,09	1,24±0,06	0,003
Cheirar	1,01±0,27	0,75±0,03	0,37	1,75±0,05	0,57±0,06	<0,0001
Empurrar	1,24±0,29	1,65±0,22	0,30	0,98±0,19	3,20±0,34	<0,0001
M.C.	0,07±0,04	0,25±0,12	0,18	0,12±0,01	0,62±0,09	0,0001
M.O.	0,20±0,08	0,40±0,02	0,38	0,45±0,05	1,47±0,15	<0,0001
Montar	0,00±0,00	0,10±0,00	0,84	0,01±0,01	0,12±0,02	<0,0001
T.M.	0,00±0,00	0,05±0,03	0,91	0,09±0,03	0,66±0,05	<0,0001

Nota: A.C.A.: Agressão por comida ou água; A/L: Agressão/luta; M.C.: Manipular a cauda; M.O.: Manipular a orelha; T.M.: Tentativa de montagem.

Para a fase de terminação todos os comportamentos estudados apresentaram efeito significativo (p≤0,05) de tratamento apenas na etapa de verão, com exceção do comportamento de montar que não teve efeito significativo (p>0,05) de tratamento em nenhuma das etapas estudadas (inverno e verão). Os comportamentos de agressão por comida ou água, agressão ou luta, empurrar, manipular a orelha e tentativa de montar foram maiores no tratamento SNClim em comparação com SClim (Tabela 8).

Tabela 8 - Média seguida de erro padrão da frequência diária dos comportamentos estudados na avaliação contínua, observados nas salas climatizada e não climatizada, nas etapas de inverno e verão, na fase de terminação.

Comportamento	Inverno - Salas			Verão - Salas		
	SClim	SNClim	Pr>F	SClim	SNClim	Pr>F
A.C.A.	0,53±0,12	0,65±0,07	0,35	0,19±0,03	0,60±0,11	0,007
A/L	0,39±0,09	0,48±0,06	0,44	0,11±0,01	0,39±0,11	0,02
Cheirar	1,79±0,41	1,04±0,04	0,08	0,92±0,11	0,36±0,08	0,001
Empurrar	1,83±0,26	1,54±0,11	0,42	0,84±0,15	2,56±0,37	0,0003
M.C.	0,12±0,03	0,23±0,07	0,09	0,11±0,02	0,30±0,03	0,009
M.O.	0,26±0,05	0,52±0,17	0,17	0,26±0,05	0,94±0,05	<0,0001
Montar	0,00±0,00	0,01±0,01	0,98	0,01±0,01	0,06±0,02	0,06
T.M.	0,01±0,01	0,03±0,02	0,68	0,07±0,01	0,35±0,04	<0,0001

Nota: A.C.A.: Agressão por comida ou água; A/L: Agressão/luta; M.C.: Manipular a cauda; M.O.: Manipular a orelha; T.M.: Tentativa de montagem.

4. Discussão

Pode-se observar que houve diferença significativa (p≤0,05), entre os tratamentos SClim e SNClim, no período de verão, com ganho de 5,4 kg de peso vivo por suíno

no sistema climatizado e comparação ao não climatizado (Tabela 2). Porém, no inverno essa diferença de 4,3 kg de peso vivo por suíno, ela não significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos. Não se evidenciou impacto da climatização, sobre o peso vivo final dos animais na etapa de inverno, devido às temperaturas médias observadas serem muito próximas (19,1±2, no SClim e 18,4±4 no SNClim), pois não ocorreu períodos prolongados de baixas temperaturas, como pode se observar na Tabela 1.

Observou-se nos períodos estudados que a climatização tem efeito positivo sobre o valor médio de peso vivo (kg), o que concorda com [22], que demostraram essa mesma relação sobre o ganho de peso médio final, quando comparado machos e fêmeas. O consumo médio diário de ração não diferiu entre os animais nos tratamentos SClim e SNClim, no inverno (Tabela 2), porém observou-se diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos no verão, com uma diferença de 120 g por animal/dia. Esses resultados estão de acordo com os de [23] e [24], os quais demostraram que o incremento de calor diminui o consumo dos suínos. O ganho de peso médio diário, teve diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos SClim e SNClim, nos períodos de inverno e verão. Em trabalho de [25] os autores demostraram resultados similares aos obtidos no presente estudo, onde animais submetidos a temperaturas fora da zona de conforto térmico apresentam menor ganho de peso. Na conversão alimentar, observou-se diferença significativa entre os tratamentos ($p \leq 0,05$) na fase de crescimento, tanto no inverno como no verão, com menores valores no tratamento SClim. O mesmo ocorreu no trabalho de [26], com valores de conversão alimentar menores para a fase de crescimento, em ambientes menos desafiadores em relação a temperaturas fora da faixa de conforto térmico. Porém, na fase de terminação, não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre tratamentos tanto no inverno como no verão. Os dados obtidos para desempenho produtivo, neste trabalho na fase de crescimento e terminação, estão de acordo com os obtidos na literatura [26], [27] e [28]. Segundo a recomendação de [29], a concentração de NH_3, não deve ultrapassar os 25 ppm para humanos e 50 ppm para animais, assim como o CO_2 não deve ultrapassar 1.500 ppm [10]. Nas Tabelas 3 e 4 observar-se que as médias de NH_3 não ultrapassaram os limites recomendados, porém as máximas sim, mas por curtos períodos de tempo, o que não ocasionou prejuízos a saúde dos suínos. Para o CO_2 os valores observados estão a baixo dos recomendados [29, 10].

A análise de variância de medidas repetidas detectou efeito significativo ($p \leq 0,05$) do período, dias de alojamento para todas as variáveis de desempenho produtivo. Já o efeito de tratamento e da interação tratamento x período x dias de alojamento foram significativas para ganho de peso médio diário e conversão alimentar, enquanto a interação entre tratamento e dias de alojamento teve efeito para peso vivo, consumo de ração médio diário e conversão alimentar. Na avaliação de

comportamento por varredura, na fase de crescimento observou-se que: andar, beber, comer, contato, sexual, correr, deitar ventralmente individualmente e ficar em pé apresentaram efeito significativo ($p \leq 0,05$) de tratamentos apenas no verão. No verão, para a fase de crescimento, os comportamentos andar, bebendo, comendo, correrendo, deitado ventralmente e em pé, apresentaram efeito significativo ($p \leq 0,05$) de tratamento, sendo mais presentes na SClim. Já o comportamento de contato e comportamento sexual, apresentaram efeito significativo ($p \leq 0,05$) de tratamento e foram mais presentes na SNClim. Esses resultados são similares aos encontrados por [25], onde é destacado que quando há incremento térmico os suínos em fase de crescimento diminuem a frequência dos comportamentos ingestivos e passam mais tempo em comportamento de contato com o meio, no intuito de troca de calor com o meio.

O comportamento de deitar em grupo foi significativamente ($p \leq 0,05$) afetado pelos tratamentos nos períodos avaliados (inverno e verão), na fase de crescimento, permanecendo constante na sala climatizada (60,76±2,26 no inverno e 60,71±1,01 no verão). Já na SNClim esse comportamento aparece em maior ocorrência no inverno (66,67±0,33) e em menor ocorrência no verão (51,19±1,19), o que pode indicar que os animais usam esse comportamento de se agrupar na SNClim, para reduzirem a perda de calor no período de inverno. Dados similares foram observados por [30]. O comportamento deitar lateralmente foi significativamente ($p \leq 0,05$) afetado pelos tratamentos avaliados, na fase de crescimento, permanecendo similar na sala climatizada (6,25±0,59 no inverno e 6,13±0,39 no verão). Por outro lado, na SNClim esse comportamento aparece em menor ocorrência no inverno (1,09±0,10) em comparação ao verão (19,78±0,62), sendo essa postura considerada um importante indicativo de estresse por calor na suinocultura. Trabalhos realizados por [31] e [32], demonstraram que em condições de temperaturas acima da faixa de conforto térmico, os animais passam mais tempo deitados lateralmente com o intuito de perderem calor para o meio, através do mecanismo de troca de calor por condução com o piso.

O comportamento andar foi significativamente ($p \leq 0,05$) afetado nos períodos avaliadas (inverno e verão), na fase de terminação, sendo mais presente na SClim (inverno 0,60±0,09 e verão 1,19±0,02), quando comparado a SNClim (inverno 0,19±0,04 e verão 0,69±0,07). Os resultados estão de acordo com [25], que sugere que os animais na SClim enfrentam menos estresse por calor, uma vez que quanto maior a submissão dos animais ao estresse por calor, mais tempo esses animais passam deitados. O comportamento deitar lateralmente foi significativamente ($p \leq 0,05$) afetado pelos tratamentos, nos períodos de inverno e verão, na fase de terminação, sendo mais presente na SNClim (inverno 27,11±0,97 e verão 49,31±0,49), quando comparado a SClim (inverno 18,93±0,60 e verão 15,27±1,61),

sendo essa postura considerada um importante indicativo de estresse por calor na suinocultura. O efeito de tratamento foi significativo ($p \leq 0,05$) também para o comportamento sentar, na fase de terminação, sendo mais presente na SClim (inverno 1,12±0,18 e verão 1,31±0,05), quando comparado a SNClim (inverno 0,83±0,06 e verão 0,77±0,09).

Os resultados obtidos na avaliação contínua, nas fases de crescimento e terminação, em todos os comportamentos estudados (agressão por comida ou água, agressão ou luta, cheirar, empurrar, manipular a cauda, manipular a orelha, montar e tentativa de montagem) foram afetados significativamente no verão. Por outro lado, o comportamento de montar, na fase de terminação, não demonstrou ser afetado pelos tratamentos ($p>0,05$) em nenhuma dos períodos estudados. O comportamento de cheirar, foi mais presente no SClim, tanto para a fase de crescimento quanto para a fase de terminação. Esse comportamento de interação focinho-focinho é um importante indicativo de bem-estar animal [33]. Todos os outros comportamentos estudados (agressão por comida ou água, agressão/luta, empurrar, manipular a cauda, manipular a orelha, montar e tentativa de monta), foram mais presentes no SNClim, na fase de crescimento. Como [34] e [35] descrevem, comportamentos agonísticos (agressões, lutas e mordeduras), são inatos dos suínos, porém eles diminuem com o estabelecimento da hierarquia no grupo. Em casos em que esses comportamentos se perpetuem, pode ser um indicativo de existência de uma incompatibilidade entre o padrão comportamental do suíno e o meio ambiente em que ele está inserido [36].

5. Conclusão

A climatização e o controle da ambiência proporcionaram melhor desempenho produtivo de suínos nas fases de crescimento e terminação, principalmente no verão.

A avaliação do comportamento dos suínos evidenciou que o ambiente climatizado reduziu a ocorrência de comportamentos indicadores de problemas de bem-estar e de estresse por calor.

A utilização de sistema de monitoramento e controle em tempo real, de parâmetros ambientais e produtivos em edificações para produção de suínos, nas fases de crescimento e terminação, proporcionam acompanhamento mais eficiente, possibilitando a intervenção técnica para correções do ambiente interno, visando um melhor desempenho zootécnico dos animais.

A climatização e a renovação do ar têm efeito direto sobre a concentração de gases, ajustando essa concentração ao crescimento metabólico dos animais, pode-se controlar o ambiente térmico para melhor desempenho produtivo dos animais.

6. Referências Bibliográficas

1. Kummer R.; Dornelles Gonçalves M. A; Tesche Lippke R, Ferreira Passos e Prado Marques B. M.; Mores T. j. *Fatores que influenciam o desempenho dos leitões na fase de creche*. Acta Scientiae Veterinariae. 2009;37(1):s195-s209.
2. Bortolanza Padilha J, Michelin Groff P, Endo Takahashi S, Einsfeld S, Ortiz Rosa E, de Andrade M, Bagatini A, , Júnior Gerhards S. *Importância do ambiente térmico na produção de suínos na fase de creche*. REVET. Revista Eletrônica de Veterinária. 2017;18(2):1-11.
3. Campos J. A. *Air quality, thermal environment and productive performance of pigs in two different types production systems*. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Construções rurais e ambiência; Energia na agricultura; Mecanização agrícola; Processamento de produ) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
4. Silva Lopes H, Santos Pinheiro E. K, Santos L. F, Oliveira E. F. F, Jesus R. F, Cardozo S. P. *Manejo térmico nas fases de maternidade e creche na suinocultura*. In: Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar (ISSN-2527-2500) & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar. 2019.
5. Oliveira A. C. D. F, Vanellli K, Sotomaior C. S, Weber S. H, & Costa L. B. *Impacts on performance of growing-finishing pigs under heat stress conditions: a meta-analysis*. Veterinary research communications, v.43, n.1, p.37-43, 2019.
6. Freitas Ramos S. C. L, Campos T. A, Junior Yanagi T, Schiassi L, Andrade Resende R. et al. *Qualidade do ar, nível de pressão sonora e ambiente térmico de dois estilos de creches para suínos*. Revista Ciência Agronômica. , Fortaleza, v. 49, n. 2, pág. 211-220. 2018. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180024
7. Sampaio P. A. C, Naas A. I, Nader A. Gases e ruídos em edificações para suínos: aplicação das normas NR-15, CIGR e ACGIH. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.10-18. 2005.
8. Barcellos Neves Santos E, D, Borowski M. S, Gheller, N. B, Santi M, Mores J. T. *Relação entre ambiente, manejo e doenças respiratórias em suínos*. Acta Scientiae Veterinariae (Brasil), 2008; 36 (1): 87-93.
9. Chantziaras I, De Meyer D, Vrielinck L, Van Limbergen T, Pineiro C, Dewulf J, Kyriazakis I, Maes D. *Environment-, health-, performance- and welfare-related parameters in pig barns with natural and mechanical ventilation*. Prev Vet Med. 2020 Oct;183:105150. doi: 10.1016/j.prevetmed.2020.105150. Epub 2020 Sep 14. PMID: 32971371.
10. Hassouna M, Eglin T, Cellier P, Colomb V, Cohan J-P. *Mesurer les émissions gazeuses en élevage: gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote*. INRA-ADEME (France), 2015, 2-7380-1375-9. hal-01590618
11. Berton P, M. Dourado, R.D.C; de Lima, F.B.F; Rodrigues, A.B.B; Ferrari, F.B; Vieira, L.D.D.C; de Souza, P.A; Borba, H. *Desempenho de crescimento-terminação e rendimento de carcaça de suínos criados em ambiente climatizado e não controlado*. Int. J. Biometeorol. 2015 , 59 , 955–960.
12. Bernabé, J.M.C; Pandora, H.; Gomes, N. F..; Holanda, M.A.C; Holanda, M.C.R; Carvalho Filho, J.L.S. *Performance of growing pigs subjected to lighting programs in climate-controlled environments.* Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,, v.24, p.616-621, 2020. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p616-621
13. Johnson, A.K; Sellbom, M. & Glenn A.L; *Traços de personalidade dimensionais amplamente e seletivamente associados ao comportamento externalizante normativo*. J Psychopathol Behav Assess 40 , 419–430 (2018). https://doi.org/10.1007/s10862-018-9665-7
14. Bus J.D; Boumans I.J.M.M; te Beest E. D; Webb L;E; Bolhuis E. J; Bokkers E.A.M. *Understanding the feeding strategies of growing-finishing pigs: Exploring links with pig characteristics and behaviour*. Applied Animal Behaviour Science. Volume 272, 2024, 106208, ISSN 0168-1591, https://doi.org/10.1016/j.applanim.2024.106208.

15. Cross A.J; Brown-Brandl T.M; Keel B.N; Cassady J.P; Rohrer G.A. *Feeding behavior of grow-finish swine and the impacts of heat stress*. Transl Anim Sci. 2020 Feb 27;4(2): doi: 10.1093/tas/023. PMID: 32705022; PMCID: PMC7201167.
16. Gomes N.F; Pandorfi H; Barnabé J.M.C; Guiselini C; Almeida G.L.P; Holanda M.C.R; Holanda M.A.C; & Silva M.V. (2021). *Comportamento de suínos submetidos a sistema de controle climático no Semiárido de Pernambuco, Brasil*. DINA, 88 (218), 34-38. Epub 15 de março de 2022. https://doi.org/10.15446/dyna.v88n218.93887
17. Silva H. L; Santos E.K.P; Santos L.F; Oliveira E.F.F; Jesus R.F; Cardozo S.P. *Manejo térmico nas fases de maternidade e creche na Suinocultura*. Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar. 2019.
18. Berton P, M. *Ambiente controlado e não controlado no desempenho, comportamento e características de carcaça de suínos*, 4, 53 p, Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2013.
19. Fàbrega E.R; Puigvert X; Soler J; Tibau J. & Dalmau A. (2013). *Effect of on farm mixing and slaughter strategy on behaviour, welfare and productivity in Duroc finished entire male pigs*. Applied Animal Behaviour Science. 143. 31–39. 10.1016/j.applanim.2012.11.006.
20. Terlouw C. *Stress reactions at slaughter and meat quality in pigs: genetic background and prior experience*. A brief review of recent findings. Livestock Production Science, Amsterdam, v. 94, p. 125-135, 2005.Z
21. SAS INSTITUTE INC. System for Microsoft Windows, Release 9.4, Cary, NC, USA, 2002-2012. (cd-rom).
22. Rodrigues, G.F; Amaral, N.O.; Amaral, L.G.M.;Santos, L. F; Dias, M.L.; Silva, H.M.F.; Gomide A.P.C. *Desempenho e qualidade de carcaça de suínos machos castrados, fêmeas e machos imunocastrados de diferentes potenciais genéticos*. Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 107–114, 2018.
23. Prekel, L.; Maes, D.;Van, B.A.; Aluwé, M. *Evaluation of a heating protocol and stocking density impact on heatstressed fattening pigs. Animal.* Volume 18, Issue 6. 101172. ISSN 1751-7311. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101172. 2024.
24. Li, H.; Rong L.; Zhang, G. *Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 149. Pages 90-100. ISSN 0168-1699. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.013. 2018.
25. Kiefer, C.; Moura, M.S.; Santos, A.P.; Silva, C.M.; Luz, M.F.; Nantes, C.L. *Respostas de suínos em terminação mantidos em diferentes ambientes térmicos*. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, Olinda, v. 11, n. 2, p. 496-504, 2010.
26. Bertol, T.M.; Campos, R.M.L.; Coldebella, A.; Filho, J.I.S.; Figueiredo, E.A.P.; Terra, N.N.; Agnes, I.B.L. *Qualidade da carne e desempenho de genótipos de suínos alimentados com dois níveis de aminoácidos.* Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 45, n. 6, p. 621-629, 2010
27. Sanches, J.F.; Kiefer, C.; Moura, M.S.; Silva, C.M.; Luz, M.F.; Carrijo, A.S. *Níveis de ractopamina para suínos machos castrados em terminação e mantidos sob conforto térmico*. Ciência Rural, Santa Maria, v. 40, n. 2, p. 403-408, 2010.
28. Guingand, N.;Lagadec, S.; Robin, P.; Hassouna, M. *Mise au point d'une méthode de mesure simplifée des émissions d'ammoniac et des gaz à effet de serre des bâtiments d'élevage de porcs en engraissement*. Journeés Recherche Porcine, Rennes, v. 4, n. 1, p. 99-203, 2011.
29. _____.4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and Moisture Production at Animal and House Levels. In: PEDERSEN, Søren; SÄLLVIK, K. (Eds.). Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences: Horsens, Denmark, 46p. 2002
30. Santos, T. C.; Carvalho, C.C.S.; Silva, G.C.; Diniz, T.A. *Influência do ambiente térmico no comportamento e desempenho zootécnico de suínos.* Revista de Ciências Agroveterinárias 17(2). DOI: 10.5965/223811711722018241. 2018.
31. Medeiros, B. B. L.; Moura, D. J. de; Massari, J. M.; Curi, T. M. R. de C.; Maia, A. P. de A. Uso da geoestatística na avaliação de variáveis ambientais em galpão de suínos criados em sistema "wean to finish" na fase de terminação. Engenharia Agrícola, v.34, p.800-811, 2014. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000500001
32. Massari, J. M.; Curi, T.M.R.; Moura, D.J.; Medeiros, B.B.L.; Salgado, D.D. *Características comportamentais de suínos em crescimento e terminação em sistema "Wean to finish".* Engenharia Agrícola 35: 646-656. 2015.
33. Held, S. D. E. & Spinka, M. *Animal play and animal welfare. Animal Behaviour* , London, v. 81, p. 891–899, 2011.

34. Teixeira, L. *Comportamento e bem-estar de leitões desmamados aos 28 dias agrupados por sexo e provenientes de diferentes tipos de maternidades*. Viçosa-MG, 2009.
35. Machado, S. P.; Caldara, F.R.; Foppa, L.; Moura R.; Gonçalves L.M.; Garcia, R.G.; Nääs, I.A.; Nieto, V.M.; Oliveira, G.F. *Behavior of pigs reared in enriched environment: alternatives to extend pigs attention*. Plos One. [S.l.], v. 12, n. 1, p. 1-18, jan. 2017.

Reprodução assistida por meio da inseminação artificial em tempo fixo (IATF): uma análise dos manuais orientativos disponíveis para produtores leiteiros

Renato Vieira dos Santos [1], Priscilla Ayleen Bustos Mac-Lean[2,*], Isabelli Natalia Fialho da Silva[3] e Eduardo Guilherme Satolo[4]

[1] São Paulo State University (UNESP), Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento, Brasil, renato.v.santos@unesp.br

[2] São Paulo State University (UNESP), Departamento de Engenharia e Biossistemas, Brasil; priscilla.mac-lean@unesp.br

[3] São Paulo State University (UNESP), Departamento de Engenharia e Biossistemas, Brasil; isabelli.natalia@unesp.br

[4] São Paulo State University (UNESP), Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia, eduardo.satolo@unesp.br

* priscilla.mac-lean@unesp.br; +55 14 3404-4264

Resumo: A inseminação artificial em tempo fixo (IATF) tem se destacado como uma solução reprodutiva para a baixa produtividade e rentabilidade das propriedades leiteiras de pequena escala, principalmente devido à possibilidade de concentração de cios, e de não precisar se observar cios como é feito na inseminação artificial convencional. Esta praticidade, entretanto, esbarra por vezes na dificuldade de preparar as propriedades para receber esta tecnologia e de localizar literatura em linguagem adequada ao perfil do produtor leiteiro. O objetivo deste artigo foi, por meio da análise documental, avaliar os manuais de IATF disponibilizados a produtores leiteiros de pequena escala quanto ao tipo de informação. Foram identificados e analisados 31 e manuais orientativos, destacando e quantificando os fatores que afetam os resultados dessa técnica de reprodução assistida. Concluiu-se que os manuais abordam de forma isolada cada fator, priorizando os aspectos sanitários da ordenha e negligenciando os demais fatores, citando-os de forma superficial. Desta forma, os manuais analisados deixaram lacunas técnicas que certamente farão falta no impacto positivo do processo reprodutivo e produtivo como um todo na exploração leiteira, e estas permitirão avanços a serem conduzidos na literatura sobre o tema.

Palavras-chave: reprodução assistida; melhoria genética; pecuária leiteira; manual para produtores; impacto econômico.

1. Introdução

Dentre os fatores que podem aumentar a produção leiteira de um plantel, ressalta-se o melhoramento genético que imprime no rebanho uma maior capacidade individual e coletiva de produzir leite. A interferência direta do homem no processo

reprodutivo dos animais, se denomina tecnologias de reprodução assistida (TRA). A inseminação artificial (IA) foi a primeira grande biotecnologia aplicada para melhorar a reprodução e a genética dos animais de criação. Teve um enorme impacto a nível mundial em muitas espécies, particularmente em gado leiteiro [1]. A inseminação artificial em tempo fixo (IATF) teve um crescimento expressivo na sua utilização, tanto na pecuária de corte quanto de leite. Em 2002, que foi o primeiro ano de avaliação feita junto aos revendedores de sêmen e associação do setor (ASBIA), computou-se a venda de 100 mil protocolos que representavam 1% das inseminações no Brasil. Em 2024, foram comercializados 23.267.777 protocolos, representando 91,8 % das inseminações realizadas no Brasil. [2]. A maioria dos protocolos de IATF utilizados na América do Sul tem sido baseado em dispositivos liberadores de progesterona (P4) e estradiol para sincronizar a emergência da onda folicular e a ovulação, com taxas de prenhez variando de 40 a 60 % [3] (p. 952). É indiscutível que a IATF oferece vantagens. Além do ganho genético com a utilização de sêmen de touros comprovados para diversos índices de produção, a terapia hormonal além de tirar vacas do anestro, possibilita que se faça inseminações em bloco, ou seja, sincroniza o ciclo estral das vacas para que sejam inseminadas no mesmo dia [4] (p.8). Na exploração leiteira a fertilidade é fator essencial para que se tenha a produção. A vaca precisa parir para produzir leite [5] (p. 451-459). Historicamente a fertilidade em vacas leiteiras está em decréscimo, sendo a falta de capacidade para emprenhar e manter-se prenhe a principal razão do descarte em rebanhos leiteiros. O problema da redução na eficiência reprodutiva é provavelmente uma combinação de vários fatores fisiológicos e de manejo [6]. Desta forma, nota-se que são diversos fatores que interferem no sucesso da técnica IATF.

Para auxiliar no processo de IATF, diversos pesquisadores e empresas desenvolveram manuais com orientações sobre como realizar o procedimento, porém com focos diferentes. Portanto, o objetivo deste artigo é apresentar o perfil de manuais voltados para produtores de leite que buscam melhorar seus indicadores associados ao programa de reprodução assistida por meio da IATF.

2. Materials and Methods

Para atender ao objetivo desta pesquisa, utilizou-se a fundamentação conceitual para construir a revisão de literatura.

O uso da fundamentação conceitual [7] permite o desenvolvimento de estruturas e modelos provenientes da obtenção de dados brutos e comparáveis da literatura. Desta forma, sua construção permitirá levantar as relações entre os diversos estudos teóricos em torno do tema e de criar ligações teóricas entre a investigação existente, as teorias atuais, o desenho da investigação, as interpretações dos

resultados e as conclusões conceptuais [8], a partir da identificação dos manuais direcionados à pecuária leiteira e elencando quais etapas da cadeia leiteira o manual aborda. Para tanto, os manuais foram obtidos em bases de dados licenciadas na Plataforma CAPES (Scopus, Scielo, Elsevier, Taylor & Francis, Web of Science, Wiley) utilizando marcadores temporais e a relevância dos periódicos (como JCR e Qualis), além de consultas em sites de empresas e órgãos governamentais envolvidos na cadeia produtiva do leite.

Em seguida, foi conduzida uma análise de conteúdo. A análise de conteúdo é tipificada pelo conjunto de métodos de análise das comunicações que visa adquirir indicadores, sejam eles quantitativos ou qualitativos, por meio de procedimentos sistemáticos e objetivos para descrever o conteúdo das mensagens. Esses indicadores possibilitam inferências sobre as condições de produção ou recepção das mensagens, também conhecidas como variáveis inferidas.

Esta análise de conteúdo do tipo indutiva, gerou a partir da leitura dos documentos a categorização das informações tendo como base os fatores que intervém no sucesso na IATF. Por fim, é gerada a discussão onde se apresentar os principais tópicos abordados pelos manuais em função dos fatores, bem como sinaliza-se as lacunas observadas

A lógica do procedimento metodológico é apresentada na Figura 1. Desta forma, neste artigo está sendo conduzida a análise de 31 manuais de IATF voltados à pecuária leiteira.

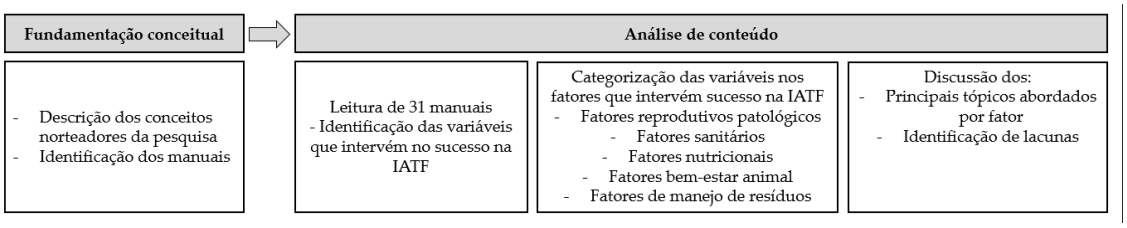


Figura 1. Procedimento metodológico.

3. Resultados

A Tabela 1 apresenta os manuais analisados e a análise geral sobre os fatores abordados. Nesta análise inicial, nota-se que os manuais não contemplam em sua descrição os sete fatores apresentados de modo conjunto. A maioria do material analisado apresenta a característica de evidenciar um ou dois fatores, priorizando fatores nutricionais, sanitários e de bem-estar, enquanto são menos atenciosos para os fatores ambientais e de manejo de resíduos. Destaca-se que entre os manuais analisados a descrição é realizada de modo superficial, por vezes não informado ou informado de modo incompleto sobre importantes condutas a serem

realizadas, seja antes, durante ou após a IATF. Desta forma, os manuais analisados deixaram lacunas técnicas que certamente farão falta no impacto positivo do processo reprodutivo e produtivo como um todo na exploração leiteira, e estas permitirão avanços a serem conduzidos na literatura sobre o tema.

Observa-se na Tabela 1, que a partir da consolidação das informações que os manuais preferencialmente abordam fatores sanitários (79%), fatores nutricionais (61%) e manejo de resíduos (45%). Itens pouco abordados remetem a fatores de bem-estar animal (30%) e fatores patológicos (6%).

Tabela 1. Identificação dos temas abordados pelos manuais de IATF para pecuária leiteira por tipo de fator.

	Fator				
Manual	Reprodutivo patológico	Sanitário	Nutricional	Bem-estar animal	Manejo de resíduo
Gobierno de México [9]	X	X	X	X	X
NDDB [10]	X	X	X	X	
Muller [11]	X	X	X	X	X
Candia et al. [12]	X	X	X	X	
FAO e IDF [13]		X	X	X	X
Do Valle [14]	X		X		
Mapa [15]	X	X	X		
IDF [16]			X	X	
Zoetis [17]	X	X	X		
Animal Care [18]		X	X		
Nestle [19]	X	X	X	X	X
PAS Campo [20]	X	X	X		X
Nogales; Grana [21]		X	X	X	X
CAP [22]	X	X	X	X	
Senasa [23]		X	X	X	X
Nova Scotia [24]	X	X	X		
Soares Filho [25]	X		X		
Heifer [26]	X	X	X		
Senar [27]		X			X
Souza [28]	X	X			X
Cerqueira et al. [29]		X	X	X	
Nieto [30]	X	X	X		
Aimar et al. [31]			X	X	X
Campos et al. [32]	X		X		
Gonçalves [33]	X	X	X		
Weiss [34]	X	X		X	
Cerva [35]	X	X	X		
Kyambogo University [36]		X			X
De Oliveira et al. [37]					X
Braga et al. [38]				X	
Salman et al. [39]			X		

Fonte: elaborado pelos autores.

4. Discussão

Um manual orientativo serve para capacitar o leitor a utilizar a forma correta de utilizar um bem de consumo ou dominar procedimentos para atingir os objetivos desejados. De um modo geral, os manuais orientativos direcionados à pecuária leiteira de baixa escala, não integram as diferentes etapas que exige um programa de reprodução assistida, especificamente a IATF. Priorizam etapas da cadeia produtiva que, muitas vezes, não são determinantes nos resultados dos procedimentos utilizados. A IATF não se resume apenas em protocolos. Inúmeros fatores devem ser levados em consideração para que se aumente a taxa de prenhez, utilizando essa biotecnologia. Mesmo antes de se iniciar a terapia hormonal, é preciso realizar ações visando acrescentar ou eliminar fatores que irão impactar diretamente nos resultados do programa de IATF. Durante e após a realização da IATF existem fatores que também deverão ser considerados. Analisando os manuais encontrados na literatura, foram elaboradas tabelas comparativas dos fatores e ações, considerados determinantes para a obtenção de resultados satisfatórios que a biotecnologia preconiza, em suas diferentes etapas: pré, durante e pós IATF.

A Tabela 2 apresenta as ações descritas nos manuais analisados para o fator reprodutivo patológico nas etapas pré, durante e pós IATF.

Tabela 2. Ações descritas nos manuais analisados para o fator reprodutivo patológico nas etapas pré, durante e pós IATF.

Etapas IATF	Ações	Não aborda	Aborda
Pré	Exame de Tuberculose	65%	35%
	Monitoramento para Tripanossomose bovina	94%	6%
	Exame de brucelose	65%	35%
	Exames IBR/BVD	84%	16%
	Exame Campilobacteriose	90%	10%
	Leptospirose	87%	13%
	Exame Neosporose	94%	6%
	Exame Tricomoníase	100%	0%
	Vacinação de doenças reprodutivas	68%	32%
	Avaliação de condição corporal- Escore corporal	100%	0%
	Avaliação aparelho reprodutor feminino	87%	13%
	Escolha e avaliação sêmen	90%	10%
Durante	Exame ginecológico	87%	13%
	Avaliação de dados zootécnicos pregressos	100%	0%
	Padronização de serviços	97%	3%

	Diagnóstico de gestação	90%	10%
	Parto	94%	6%
Pós	Acompanhamento ginecológico pós aborto	100%	0%
	Absorção embrionária	100%	0%
	Retorno do cio	97%	3%

Fonte: elaborado pelos autores.

Analisando nos manuais, quanto a pré IATF, observa-se que os fatores reprodutivos patológicos são pouco citados. As doenças reprodutivas, condições anatômicas e fisiológicas do sistema reprodutivo das fêmeas bovinas são fatores determinantes para o sucesso ou insucesso da prenhez. O escore corporal das vacas não foi citado em nenhum dos manuais como pré-requisito para a seleção do animal a ser protocolado. A realização de exames de brucelose e tuberculose apresentaram os mesmos índices (35 %), certamente por serem zoonoses e fazerem parte de um programa governamental de controle e erradicação da Brucelose e Tuberculose (PNCEBT). A Brucelose causa abortos, assim como a leptospirose, mas ela sempre é atrelada a Tuberculose quando se trata de citações literárias. As vacinas reprodutivas tiveram uma considerável citação (32 %) em comparação às demais ações, fato esse já esperado pelo viés econômico que elas possuem.

Durante o procedimento, protocolagem das fêmeas, pouca atenção foi dada ao exame ginecológico e padronização nos serviços utilizados. Os dados pregressos não foram citados, onde retenção de placentas e abortos são dados decisivos para não efetivar o serviço.

No pós serviço de IATF pouca citação ou nenhuma foi encontrada. O DG (diagnóstico de gestação) aos 30 dias pós IATF é fundamental para, caso não ocorra retorno ao cio. A reabsorção embrionária e aborto são dados que devem ser computados para decisões futuras.

A Tabela 3 apresenta as ações descritas nos manuais para o fator sanitário nas etapas pré, durante e pós IATF.

Tabela 3. Ações descritas nos manuais analisados para o fator sanitário nas etapas pré, durante e pós IATF.

Etapas IATF	Ações	Não aborda	Aborda
Pré	Controle de ectoparasitas - carrapatos e moscas		
	Testes de sensibilidades a carrapaticidas	74%	26%
	Higienização de instalações	100%	0%
	Checagem de equipamentos e utensílios a serem utilizados	52%	48%
	Vacinas reprodutivas	90%	10%
		68%	32%

Durante	Higienização adequada de vulva externa	97%	3%
	Pessoal suficiente e treinado para o procedimento	94%	6%
	Disponibilidade de água corrente	81%	19%
Pós	Acompanhamento ginecológico pós aborto	100%	0%
	Absorção embrionária	100%	0%
	Retorno do cio	100%	0%
	Período de carência hormônio	94%	6%

Fonte: elaborado pelos autores.

O controle sanitário do rebanho e instalações complementam o programa de reprodução assistida utilizando a IATF. O controle de ectoparasitas como carrapatos e moscas foi citado em 26 % dos manuais, visto que o clima tropical favorece sua multiplicação e causa enormes prejuízos, principalmente na pecuária leiteira. O teste de sensibilidade aos carrapaticidas não foi citado. O uso indiscriminado tem causado progressivamente a resistência dos carrapatos aos produtos existentes. Entre os danos que os carrapatos causam nos rebanhos, a anemia é um dos fatores que levam ao anestro e consequente infertilidade. A higienização das instalações foi citada em 48 % dos manuais, mas certamente com enfoque nas boas práticas de ordenha. Não houve correlação com a reprodução, especificamente a IATF, assim como a checagem de equipamentos e utensílios também foram citados em 10 % dos manuais que deram enfoque à linha de ordenha.

Durante o procedimento de IATF, medidas sanitárias como a limpeza externa do aparelho reprodutivo da fêmea, citada em apenas 3 % dos manuais, é de extrema importância na prevenção de infecções iatrogênicas causadas pelo homem. A educação sanitária de pessoas envolvidas no programa de reprodução assistida, foi citada em 6 % dos manuais, mas de maneira generalista, ou seja, utilizada em várias ocasiões rotineiras de uma propriedade leiteira. A disponibilidade de água corrente foi citada em 19 % dos manuais, de maneira generalista também.

No pós serviço de IATF, a questão sanitária em relação à fêmea protocolada, não foi citada em nenhum dos manuais. A investigação da reabsorção embrionária e aborto, bem como cios repetitivos, devem fazer parte dos procedimentos do programa. O período de carência dos hormônios utilizados na terapia hormonal, foi citado em 6% dos manuais, certamente por fazer parte da especificação do produto comercial e não como alerta para quem vai iniciar um programa em vacas em lactação, para respeitarem o período de carência para venda ou utilização do leite.

A Tabela 4 apresenta as ações descritas nos manuais para o fator nutricional nas etapas pré, durante e pós IATF.

Tabela 4. Ações descritas nos manuais analisados para o fator nutricional nas etapas pré, durante e pós IATF.

Etapas IATF	Ações	Não aborda	Aborda
Pré	Avaliação do escore corporal		
	Pastagens: ajuste de taxa de lotação por Hectare/UA	74%	26%
	Previsão de volumoso e concentrados a serem utilizados	74%	26%
	Dimensionamento de cochos necessários	58%	42%
	Avaliação dos bebedouros	84%	16%
	Armazenamento de suplementos alimentares	71%	29%
Durante	Suplementação adequada das matrizes protocoladas	84%	16%
	Avaliação qualidade da silagem	52%	48%
	Manutenção da qualidade e quantidade de água	81%	19%
Pós	Suplementação adequada das matrizes protocoladas	71%	29%
	Manutenção da qualidade e quantidade de água	65%	35%
		74%	26%

Fonte: elaborado pelos autores.

Os fatores nutricionais pré IATF são de extrema importância para o sucesso do programa. Em 26 % dos manuais foi citada a avaliação do escore corporal. É de senso comum em qualquer atividade de produção animal que o escore corporal expressa, além da saúde individual, o desempenho daquela unidade de produção, seja ela pequena, média ou grande. A questão das pastagens, quando ela preenche quase a totalidade da fonte de alimentação do rebanho, deve ser planejada com ajuste de taxas de lotação. Em 26 % dos manuais a pastagem foi citada de maneira generalista e não específica para programas de IATF.

A previsão de volumosos e concentrados para suplementação foi citada em 42 % dos manuais, demonstrando um interesse maior, visto que, a variação climática de ocorrência mundial, dificulta a produção de forragens, tanto em volume quanto em valor nutricional.

O efeito sanfona, onde o rebanho ganha peso nos períodos chuvosos e temperaturas mais elevadas e perdem peso no inverno onde predomina a baixa temperatura, baixo índice pluviométrico onde as plantas perdem seu poder de germinação e crescimento. O dimensionamento de cochos foi citado em 16 % dos manuais, também de maneira generalista, realçando que o espaço de cocho deve ser respeitado para melhor aproveitamento pelos animais suplementados. Os bebedouros foram citados em 29 % dos manuais. A água em quantidade e qualidade é fundamental para o bom desempenho reprodutivo e produtivo. O armazenamento de alimentos para suplementação foi citado de maneira

generalista em 16 % dos manuais. A grande preocupação ao se armazenar grãos e forragens é a manutenção de sua qualidade. A deterioração por entrada de ar em silos ou infestação de insetos ou roedores em armazéns, são fatores que devem ser levados em consideração sempre que se optar por fazer reservas de alimentos.

Os fatores nutricionais durante e após a IATF citados nos manuais foram: suplementação das matrizes (48%); avaliação da qualidade das silagens (19%) e qualidade e quantidade de água ofertadas aos animais (29%). Foram citados de maneira generalizada, sendo fatores básicos para qualquer atividade que envolva animais.

A Tabela 5 apresenta as ações descritas nos manuais para o fator nutricional nas etapas pré, durante e pós IATF.

Os fatores ambientais devem ser levados em consideração pois afetam os índices reprodutivos. Alguns dos fatores ambientais são válidos para etapas pré, durante e pós.

O manejo das pastagens e controle de pragas não foram citados nos manuais. As pastagens são uma fonte de alimentação de custo baixo, em relação às silagens e concentrados, mas podem ser fonte também de plantas tóxicas e pragas de pastagens que causam ferimentos nos animais com seus espinhos e ainda competem com a produtividade das forrageiras. A questão da água da bebida foi citada em 10 % dos animais. Falando em questão ambiental em relação a água, em bebedouros que utilizam as lagoas, pode ocorrer contaminação tanto por produtos químicos utilizados em plantações adjacentes quanto por microrganismos patogênicos que podem causar doenças ou intoxicação por toxinas que acumulam nesses lagos de água parada, principalmente os clostrídios (Botulismo).

Tabela 5. Ações descritas nos manuais analisados para o fator ambiental nas etapas pré, durante e pós IATF.

Etapas IATF	Ações	Não aborda	Aborda
Pré	Manejo de pastagens- piquetes e controle de pragas	100%	0%
	Avaliação de bebedouros- qualidade da água	90%	10%
	Calor- adequar instalações e sombreamentos	90%	10%
	Remoção de obstáculos desnecessários	100%	0%
	Evitar vias de acesso alagadas ou com pedras (saúde cascos)	97%	3%
	Uso de pedilúvio	94%	6%
Durante	Manejo de pastagens- piquetes e controle de pragas	100%	0%
	Avaliação de bebedouros- qualidade da água	90%	10%

	Calor- adequar instalações e sombreamentos	94%	6%
	Manejo de pastagens- piquetes e controle de pragas	100%	0%
Pós	Avaliação de bebedouros- qualidade da água	90%	10%
	Calor- adequar instalações e sombreamentos	97%	3%

Fonte: elaborado pelos autores.

O calor é um dos fatores que mais interferem negativamente na taxa de concepção em qualquer de reprodução bovina. É o chamado estresse térmico. Em apenas 10 % dos manuais ele foi mencionado como fator ambiental que interfere diretamente na taxa de reprodução e o simples fato de se realizar os procedimentos da IATF em horários de temperaturas mais amenas, já mexe positivamente nos índices reprodutivos. A remoção de obstáculos não foi citada nos manuais levantados.

Na pecuária leiteira de baixa escala, é relativamente comum a falta de investimentos refletida na precariedade das estruturas. Terrenos alagados com excesso de barro e caminhos pedregosos contribuem para aumentar os problemas de cascos e consequentemente o aumento de procedimentos técnicos e uso de medicamentos, ressaltando que o sofrimento por ferimentos, impacta negativamente na reprodução e produção. A saúde dos cascos foi citada em 3 % dos manuais. O uso de pedilúvio foi mencionado em 6 % dos manuais. A baixa prevalência da utilização de pedilúvios em propriedades reflete um descaso ou falta de conhecimentos técnicos por parte do produtor que negligencia a medicina preventiva e prioriza a medicina curativa que é mais dispendiosa.

A Tabela 6 apresenta as ações descritas nos manuais para o fator bem-estar animal nas etapas pré, durante e pós IATF.

O bem-estar animal no pré e pós IATF leva em consideração a condição geral da matriz. Em 6% dos manuais foi citado a condição geral da fêmea, o que nos remete ao escore corporal. O bem-estar animal ao se analisar, notamos que a nutrição, sanidade, o ambiente e todo manejo, se adequados, refletem em bem-estar animal. Em 29% dos manuais, as 5 liberdades animal foram citadas de maneira geral. Entretanto indica uma preocupação crescente com a maneira como são produzidos os alimentos de origem animal, não mais se preocupando apenas com a produtividade e qualidade do produto onde o animal era apenas uma fase da linha de produção e logística. O bem-estar reflete sim em produtividade e qualidade, mas se tornou uma obrigação da cadeia produtiva evitar qualquer tipo de privação ou sofrimento aos animais.

O bem-estar animal no pré e pós IATF leva em consideração a condição geral da matriz. Em 6% dos manuais foi citado a condição geral da fêmea, o que nos remete

ao escore corporal. O bem-estar animal ao se analisar, notamos que a nutrição, sanidade, o ambiente e todo manejo, se adequados, refletem em bem-estar animal. Em 29% dos manuais, as 5 liberdades animal foram citadas de maneira geral. Entretanto indica uma preocupação crescente com a maneira como são produzidos os alimentos de origem animal, não mais se preocupando apenas com a produtividade e qualidade do produto onde o animal era apenas uma fase da linha de produção e logística. O bem-estar reflete sim em produtividade e qualidade, mas se tornou uma obrigação da cadeia produtiva evitar qualquer tipo de privação ou sofrimento aos animais.

Tabela 6. Ações descritas nos manuais analisados para o fator bem-estar animal nas etapas pré, durante e pós IATF.

Etapa IATF	Ações	Não aborda	Aborda
Pré	Avaliar condição geral da matriz		
	Suplementação adequada de volumoso e	94%	6%
	concentrados	87%	13%
	Água de boa qualidade e quantidade à vontade	84%	16%
	Sombras disponíveis - árvores ou barracões	84%	16%
	Treinamento de manejo para envolvidos no protocolo	97%	3%
	Garantir 5 liberdades animal-	71%	29%
Durante	Avaliar condição geral da matriz		
	Suplementação adequada de volumoso e		
	concentrados	97%	3%
	Água de boa qualidade e quantidade à vontade	84%	16%
	Sombras disponíveis - árvores ou barracões	81%	19%
	Não misturar animais de lotes diferentes-respeitar	84%	16%
	hierarquia	97%	3%
Pós	Avaliar condição geral da matriz		
	Suplementação adequada de volumoso e	97%	3%
	concentrados	87%	13%
	Água de boa qualidade e quantidade à vontade	84%	16%
	Sombras disponíveis - árvores ou barracões	84%	16%

Fonte: elaborado pelos autores.

Durante a IATF se repete os procedimentos de bem-estar animal que são exigidos no pré procedimento de IATF. A única ressalva que foi citada em 3 % dos manuais é de não misturar lotes diferentes. Os bovinos são segregados, ou seja, vivem em rebanho, grupos, onde existe uma hierarquia. No dia do manejo em curral, é muito importante que não se misture lotes diferentes, para não haver disputas pela dominância daquele espaço, o que a expectativas dos animais é seu novo território. Isso vai acarretar muito estresse, que certamente vai impactar negativamente nos índices reprodutivos.

5. Conclusões

Existe uma lacuna na literatura de manuais específicos para reprodução assistida IATF, que relacionam os fatores impactantes nos resultados esperados para que eles sejam supridos ou suprimidos elevando, assim, a taxa de desfrute do rebanho. Desta forma, torna-se importante o desenvolvimento de manuais que aborde e correlacione todos os fatores envoltos a reprodução assistida IATF em uma linguagem que permita a produtores leiteiros de diferentes portes obter os benefícios desta prática.

Author Contributions: Conceptualization, R.V.S. and E.G.S; methodology, R.V.S ande E.G.S..; validation, P.A.B.M-L; formal analysis, R.V.S; P.A.B.M-L; E.G.S.; writing—original draft preparation, R.V.S; P.A.B.M-L; E.G.S.; I.N.F.S.; writing—review and editing, P.A.B.M-L; I.N.F.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Institutional Review Board Statement: Not applicable for studies not involving humans or animals.

Informed Consent Statement: Not applicable

Data Availability Statement: https://doi.org/10.48321/D11378E6C3

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Foote, R.H. The history of artificial insemination: Selected notes and notables. Journal of Animal Science, 2002, v.80, n.2, p. 1-10.
2. Baruselli, P.S. (Universidade de São Paulo, FMVZ, São Paulo, Brasil). Após 2 anos de queda, mercado de IATF retoma crescimento. Boletim Eletrônico do Departamento de Reprodução Animal/FMVZ/USP, 9 ed., de 26 de fevereiro de 2025. Avaiable online: https://vra.fmvz.usp.br/boletim-eletronico-vra/. Acess in: 17 março 2025
3. Bó, G.A.; Huguenine, E.; De La Mata, J.J.; Núñez-Olivera, R.; Baruselli, P. S.; Menchaca, A. Programs for fixed-time artificial insemination in South American beef cattle. Animal Reproduction, v. 15, n. Suppl 1, p. 952, 2018. https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2018-0025
4. Nogueira, E.; Silva, J.C.B.; Silva. M.R.; Silva, A.S.; Rodrigues, W.B.; Bezerra, A.O.; Jara, J.P.; Silva, K.C.; Anache, N.A. IATF + CIO: Estratégia prática de avaliação de cio e aumento de prenhez. Corumbá: Embrapa Pantanal. Circular Técnica, 113, 2016, p. 8.
5. Soares, S.R.V.; Reis, R.B.; Dias, A.N. Fatores de influência sobre o desempenho reprodutivo em vacas leiteiras. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec., 2021, v.73, n.2, p.451-45. https://doi.org/10.1590/1678-4162-11689
6. Ambrose, D.J.; Colazo, M.G.; Kastelic, J.P. As aplicações da inseminação cronometrada e da transferência cronometrada de embriões no manejo reprodutivo de bovinos leiteiros. Revista Brasileira de Zootecnia (suplemento específico), 2010, v. 39, p. 383-392. https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300042
7. Jabareen, Y. Building a conceptual framework: philosophy, definitions, and procedure. International journal of qualitative methods, 2009, v. 8, n. 4, p. 49-62. https://doi.org/10.1177/160940690900800406
8. Sampaio, R. C.; Lycarião, D. Análise de conteúdo categorial: manual de aplicação. Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2021.
9. Gobierno De México. Manual de Buenas Prácticas Pecuarias en unidades de producción de leche bovina. 2a ed. Agricultura - Secretaria de Agricultura Y Desarrollo Rural; Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, Ciudad de México, México, 2019. www.gob.mx/senasica
10. NDDB - National Dairy Development Board. Handbook of Good Dairy Husbandry Practices. 2021, 204 p. Available online: https://www.dairyknowledge.in/sites/default/files/book/fbook/handbook-dhp/files/assets/basic-html/page-122.html. Acess in: 21 abr. 2024.
11. Muller, C.J.C. The dairy farming handbook. Western Cape Department of Agriculture, South Africa, 2017, 346 p. Available online: https://www.elsenburg.com/wp-content/uploads/2022/01/The-Dairy-Farming-Handbook-2017-Web-version_0.pdf. Access in: 21 abr. 2024.
12. Candia, F.F.F. (Nueva Zelandia); Idoyaga, H.F. (Alemania); Mendonza, L. (Chile); Echeverria, P. (Paraguay). Guía de buenas prácticas pecuarias em producción lechera. Servicio Nacional de Calidad y Salud Animal, CONACYT, 2016.

13. FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations; IDF- International Dairy Federation. Guia de boas práticas na pecuária de leite. Produção e Saúde Animal Diretrizes, 8rd ed. Rome, Italy, 2013, 40p.
14. Do Valle, E.Z.; Andreotti, R.; Thiago, L.R.L.S. Técnicas de manejo reprodutivo em bovinos de corte. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil, 2000, 61p.
15. MAPA - Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Guia orientativo para elaboração do Plano de Qualificação de Fornecedores de Leite - PQFL. Coordenação Geral de Produção Animal, MAPA, Brasília, Brasil, 2019 - Versão 1.2. Available onliine: https://drive.google.com/file/d/1k-ufj0Fn5hrQTQEClkbHHnf47S1h8EBp/view
16. IDF - International Dairy Federation. The IDF Guide to Good Animal Welfare in Dairy Production 2.0. Bulletin of IDF N° 498/2019 – Free of charge. Paris: World Organization for Animal Health, 42 p., abr. 2019.
17. ZOETIS. Manual de IATF para gado de corte. 2019. Available online: https://www2.zoetis.com.br/content/_assets/PDF/Gerar/1_zoetis-2019-manual-iatf.pdf. Acess in: 21 abr. 2024.
18. Animal Care. Reference Manual, 4th ed., Arlington, VA, United States. 2017; 138p. Available online: https://nationaldairyfarm.com/dairy-farm-standards/animal-care/farm-animal-care-version-4/
19. NESTLÉ. Manual de buenas prácticas en ganaderia lechera. Republica Dominicana, enero 2017; 56p. Available online: https://www.nestle.do/sites/g/files/pydnoa256/files/nestle-en-la-sociedad/documents/nestle%20manual%20buenas%20practicas.pdf. Acess in: 21 abr. 2024.
20. PAS CAMPO – Programa Alimentos Seguros, Setor Campo. Boas práticas agropecuárias na produção leiteira – Parte I – Brasília, DF :Embrapa Transferência de Tecnologia, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2005; 39 p.
21. Nogales, H.; Grana, D. Guía de buenas prácticas pecuarias. Resolución técnica 0217. Agencia de Regulación y Control Fito y Zootesanitario, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, Ecuador, 2012; 50p.
22. CAP - Confederação dos Agricultores de Portugal. Manual de bem-estar animal. Lisboa, Portugal, junho de 2018; 112p.
23. SENASA - Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú. Guia para la implementación de buenas prácticas pecuarias (BPP) en explotaciones lecheras. Ministério de agricultura e riego. Peru, 2020; 25p.
24. NOVA SCOTIA. Department Of Agriculture. Dairy Production Manual: a guide for 4-H leaders and beginning farmers. Thinkfarm ed. Nova Scotia, Canada: Canadian Agricultural Partnership, Canada, 2019; 93p. Available online: https://novascotia.ca/thinkfarm/documents/Manual-Dairy.pdf.
25. Soares Filho, C.V. Manejo de bovinos leiteiros adultos. Universidade Estadual Paulista - Curso de Medicina Veterinária. Araçatuba, São Pauo, Brasil, 2018; 13p. Available in: https://docs.ufpr.br/~freitasjaf/artigos/manejogeral.pdf. Acess in: 21 abr. 2024.
26. HEIFER INTERNATIONAL TANZANIA. Dairy farming manual, 2 ed., Tanzania, South Africa, 2015; 78p. Available online: https://assets.echocommunity.org/publication_issue/4f391a15-4e00-4a90-9b3c-7e5f35807e98/en/integrated-smallholder-dairy-farming-manual-2015.pdf. Access in: 21 abr. 2024.
27. SENAR - Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. Sanidade animal: administração de medicamentos em bovinos. 3.ed. Brasília, Brasil, 2015; 116p.
28. Souza, V.F. Manejo sanitário do rebanho. In Melhoramento aplicado em gado de corte. 1ed, Rosa, A.N.; Martins, E.N.; Menezes, G.R.deO.; Silva, L.O.C., Embrapa Gado de Corte, Embrapa, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2013; 257p. Available online: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/127721/1/Melhoramento-Genetico-Capitulo-7.pdf
29. Cerqueira, J.L.; Araújo, J.P.; Correia, M.J.; Palma, A.G.; Cantalapiedra, J.; Ferreira, A. Manual de boas práticas: Bem-estar bovinos. 1ed, UCADESA, União de Cooperativas de Agrupamentos de Defesa Sanitária de Entre Douro e Minho, 2017.
30. Nieto, D.; Berisso, R.; Demarchi, O.; Scala, E. Manual de Buenas Prácticas de Ganadería Bovina para la Agricultura Familiar. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (MAGyP). Buenos Aires, Argentina, 2012; 169p.
31. Aimar, M. V.; Amalfi, J. M.; Campos Carlés, S.; Charlon, V.; Cristiano, G.; Delbino, F.; Varaldo, E. Buenas práticas lecheras: Guía para la implementación en la producción de leche bovina. Red de Buenas Prácticas Agropecuárias, Argentina, 25 marzo 2021; 96p.
32. Campos, B. A.; Rodrigues, B.F.C.; Lima, I.R.F.; Carvalho, L.R.R.A.; Araújo, N.L.S.; Moura, M. F.; Galvão, W.R.S. Bases da reprodução animal**.** Editora UFPB, e-book, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2022; 263p.
33. Gonçalves, E. Guia prático de produção intensiva de leite. Rio de Janeiro: Sebrae: Senar: FAERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007; 32p.
34. Weis, G.C.C.; Vargas, A.C.; Santos, A.C.M.; Balzan, C. Boas práticas agropecuárias na produção de leite. 1. ed. – Santa Maria, RS : UFSM, Pró-Reitoria de Extensão, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 2022; 44p.
35. Cerva, C. Manual de boas práticas na produção de leite em propriedades de agricultura familiar do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: FEPAGRO, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013; 34p.
36. Kyambogo University. Dairy Farmers Training Manual. Kampala, Uganda, South Africa, 2019; 28p.
37. De Oliveira, V.M.; Mendonca, L.; Pires, M.; De Miranda, J.E.C.; Diniz, F.; Vicentini, N., de Costa, L. R.; De Magalhaes, V. M. A. Boas práticas de ordenha na propriedade familiar para obtenção de leite e queijo artesanal de qualidade: cartilhas elaboradas conforme metologia e-Rural. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
38. Braga, W.A.; Pirovani, G. P.; Oliveira, A.F.M.; Moulin, I.R.M.; Charpinel, L.S. Boas práticas e bem-estar animal no controle de mastite e carrapatos em vacas leiteiras. Boletim Técnico, Recurso eletrônico. Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia. Espírito Santo, Brasil, 2020; 20p.

39. Salman, A.K.D.; Osmari, E.K., Dos Santos, M.G.R. Manual prático para formulação de ração para vacas leiteiras. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia, Porto Velho, Rondônia, Brasil, 2011; 28p.

Empleo de la tecnología EBD para mejorar la valorización de purines de porcino con menos carga contaminante y de nitrógeno

Manuel Soler Méndez [1*], Dolores Parras Burgos [2], y José Miguel Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia

[2] Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. dolores.parras@upct.es

* Autor para correspondencia: manuel.ia@agrosolmen.es

Resumen: La agricultura actual se encuentra con el reto de tener que generar mayor cantidad de alimento frente a una población creciente, manteniendo la sostenibilidad ambiental. Es importante la fertilidad del suelo para facilitar el óptimo desarrollo de los cultivos. Frente a un deterioro progresivo de la calidad del suelo y del agua, las enmiendas orgánicas pueden facilitar una mejora en la estructura del suelo, así como proporcionar nutrientes al cultivo. Un problema que presentan las enmiendas orgánicas procedentes de purines animales es el alto contenido en nitrógeno y en contaminantes. La tecnología EBD (Environmental Balance Devices) promueve la proliferación de microorganismos que descontaminan el purín, consiguiendo reducir las concentraciones de metales pesados y de nitrógeno entre otros, por encima del 70% con respecto al control. La aplicación del purín, correctamente tratado, bien por fertirriego o como enmienda orgánica, resulta más interesante para cumplir las regulaciones de contaminación ambiental.

Keywords: Valorización de purines; enmiendas orgánicas; EBD; biorremediación; tratamiento de purín con microorganismos.

1. Introducción

La población mundial experimenta una tendencia creciente sostenida, lo que incrementa significativamente la presión sobre los sistemas alimentarios globales. Según estimaciones recientes de Naciones Unidas, se prevé que la población alcance aproximadamente los 9.700 millones de personas para 2050, lo que representa un incremento sustancial frente a los aproximadamente 8.000 millones actuales [1]. La agricultura, por tanto, se enfrenta al reto de tener que producir mayor cantidad de alimentos para abastecer a esta población creciente.

La fertilidad del suelo es fundamental para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos, resultado del constante aumento poblacional. Mantener y mejorar dicha fertilidad mediante prácticas sostenibles, como la valorización del purín como

fertilizante orgánico, es crucial para asegurar sistemas agrícolas productivos, rentables y respetuosos con el medio ambiente [2, 3, 4].

Frente al deterioro progresivo de la calidad del suelo y del agua, las enmiendas orgánicas pueden mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes esenciales para los cultivos. Además, su aplicación contribuye a la conservación del suelo y a una producción agrícola más sostenible [5, 6]. Las enmiendas orgánicas procedentes de purines animales se caracterizan por su elevado contenido en nitrógeno. Este alto contenido nitrogenado, si no se gestiona adecuadamente, puede provocar pérdidas por volatilización y lixiviación, contaminando el aire y las aguas subterráneas. Además, los purines pueden contener otros contaminantes, como metales pesados y patógenos, que representan riesgos ambientales y para la salud humana [2, 7]. Las administraciones europeas han intensificado sus esfuerzos en evaluar y reconocer técnicas innovadoras que permiten reducir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero generados por la actividad ganadera. Entre estas técnicas se encuentra la aplicación de microorganismos específicos para el tratamiento biológico del purín, que actúan mediante procesos naturales para disminuir significativamente su carga contaminante y mitigar las emisiones asociadas. Este tipo de soluciones biotecnológicas se incluye en documentos técnicos oficiales como los elaborados por el Centro Común de Investigación (Joint Research Center - JRC) de la Comisión Europea, dentro del marco de las Mejores Técnicas Disponibles (en adelante MTD) para el sector agropecuario [8].

La biorremediación es una técnica que utiliza microorganismos vivos, principalmente bacterias y hongos, con el propósito de degradar, transformar o eliminar sustancias contaminantes presentes en suelos, aguas o residuos, aprovechando su capacidad metabólica natural. Esta técnica se basa en la actividad biológica natural de dichos microorganismos, acelerando procesos que, de otro modo, ocurrirían de forma lenta o incompleta en la naturaleza [9]. Se trata de una técnica caracterizada por su eficacia, sostenibilidad y bajo impacto ambiental, y por tal motivo, se considera una alternativa destacada para mitigar la contaminación asociada al sector agropecuario.

El purín constituye un ambiente particularmente agresivo debido a su alta concentración de contaminantes orgánicos, lo que genera elevadas cantidades de especies reactivas de oxígeno (en adelante ROS). Estas ROS provocan estrés oxidativo sobre los microorganismos presentes, dañando estructuras celulares clave y dificultando significativamente su supervivencia, crecimiento y capacidad degradativa [10]. Por esta razón, las estrategias de biorremediación aplicadas al purín deben considerar mecanismos específicos que permitan a los

microorganismos adaptarse y superar esta situación de estrés oxidativo, facilitando así una descontaminación eficiente.

La hipótesis de partida de este trabajo es la siguiente:

La Naturaleza parte de una situación originaria de equilibrio, en el que existen campos de energía balanceados. La Tierra genera, gracias a las características y movimiento de su núcleo, un campo de energía a través de partículas con carga negativa (en adelante NEP-). Estas partículas están en equilibrio con las partículas con carga positiva (en adelante PEP+) que proceden del espacio interplanetario [11, 12]. M. Peltier confirma esta hipótesis, indicando que el globo terrestre es completamente negativo, y que el espacio interplanetario positivo; la atmósfera no tiene electricidad por sí misma, sino que está en un estado pasivo, y los efectos que se producen en ella provienen de los dos grandes almacenes de electricidad (el globo terrestre y el espacio interplanetario) [13]. La actividad humana y la contaminación en el suelo, el aire y el agua hacen que el equilibrio entre NEP- y PEP+ se pierda, aumentando la concentración de NEP-. Se produce la degeneración del oxígeno estable, con la pérdida de un electrón, en ROS.

Los sistemas EBD, siglas que provienen del inglés Environmental Balance Device, que significa Dispositivo de Equilibrio Ambiental, están compuestos por una combinación de minerales, siendo el cobre el elemento más importante, que son capaces de generar una atracción de PEP+ en la zona donde están instalados [12], aumentando el estado de excitación de las frecuencias atómicas de la materia situada arriba, abajo y alrededor de los dispositivos EBD [14]. La composición específica de minerales y su distribución en cada dispositivo, estando los dispositivos instalados con una configuración determinada, hace que se canalicen los campos energéticos de la zona tratada. De esta manera, se aumenta la concentración de PEP+, equilibrándose con la concentración de NEP-; este proceso puede tardar entre dos y seis meses. Al balancear los campos energéticos, se reduce en gran medida la concentración de ROS gracias a que se regeneran en moléculas de oxígeno estable, aceptando el electrón perdido. De esta manera, se ve favorecida la vida celular, permitiendo a los microorganismos autóctonos que se alimentan de materias contaminantes (gases contaminantes, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, etc.) que incrementen su población de forma exponencial, segregando enzimas que ayudarán a reducir la carga contaminante del ambiente [12,14].

El objetivo principal de este trabajo es valorar y comprobar la efectividad en reducción de nitrógeno y cargas contaminantes del purín de los dispositivos EBD en

almacenamientos de purín de granjas de porcino; para ello, se ha comparado la caracterización del purín en balsas tratadas con EBD con respecto a balsas control.

2. Materiales y Métodos

2.1. Planteamiento experimental

Se planteó un estudio en una granja en Lorca (Murcia, España), enfocado a comprobar la efectividad de la tecnología EBD en el tratamiento del purín en una balsa, en comparación con otra balsa control de la misma granja. Se trata de una granja de 1500 unidades de cebo, 1000 unidades de lechones, y 220 unidades de madre. En la balsa EBD, se colocaron alternados y a lo largo de todo el perímetro, 6 dispositivos Mud Pack y 6 dispositivos Soil Pack. El ensayo tuvo comienzo en verano de 2021, y se realizaron tres mediciones en verano, otoño y primavera.

Este estudio venía a respaldar los resultados analíticos de otro estudio realizado en una granja en Pulpí (Almería, España). En este caso se trata de una granja de 8000 unidades de lechones, 2740 unidades de madre y 10 unidades de berracos. La granja disponía de una serie de balsas, en total 5, todas con EBD instalados desde febrero de 2020. El purín bruto se recepcionaba en la primera balsa, después, mediante una separación de fases, la fase líquida era conducida a la balsa 2, en la que el purín recibía aireación para fomentar los procesos de nitrificación-desnitrificación; en las balsas 3 y 4, el purín pasaba por un proceso de sedimentación, y en la última balsa, el resultado final del tratamiento era almacenado para su valorización como fertilizante u enmienda orgánica.

2.2. Metodología de caracterización del purín

El contenido total de nitrógeno se ha analizado mediante la metodología PTA-FQ-036, Dumas, basado en UNE-EN 13654-2.

El contenido total de fósforo se ha analizado mediante la metodología PTA-FQ-029, Extracción basado en UNE-EN 15956, ICP-AES basado en UNE-EN 16963.

El contenido en cinc se ha analizado mediante la metodología PTA-FQ-027, ICP-AES basado en UNE-EN 16963.

El contenido de E.coli se ha analizado mediante la metodología PTA-MC-042. Número más probable miniaturizado.

El contenido de coliformes totales se ha analizado mediante la metodología PTA-MC/037. Recuento en placa.

El contenido en enterobacterias totales se ha analizado mediante la metodología PTA-MC/036. Recuento en placa.

2.3. Metodología para el análisis de datos

Se comparan medición a medición los resultados entre la balsa inicial 1 y la balsa final 5, calculando las reducciones observadas en cada medición. Finalmente, se establece la media entre todas las reducciones obtenidas.

3. Resultados

En la Tabla 1 se reproducen los resultados de las mediciones obtenidas para nitrógeno total, fósforo total, cinc, E.coli, coliformes totales, y enterobacterias totales, en la granja de Pulpí, para las balsas 1 y 5. En dicha tabla se calculan las reducciones en los contenidos de los distintos parámetros, medición a medición, observadas en la balsa 5 con respecto a la balsa 1, y se calcula el promedio de las reducciones observadas.

Tabla 1. Mediciones y reducciones observadas en la balsa 5 con respecto a la balsa 1, en la granja de Pulpí, para nitrógeno total, fósforo total, cinc, E.coli, coliformes totales y enterobacterias totales.

	Nitrógeno total (%) p/p			Fósforo total (%) p/p			Cinc (ppm)		
Fecha	Balsa 1	Balsa 5	Reducción (%)	Balsa 1	Balsa 5	Reducción (%)	Balsa 1	Balsa 5	Reducción (%)
23/04/2020	0,2300	0,1500	34,8%	0,0628	0,0117	81,4%	10,8000	2,6900	75,1%
28/05/2020	0,2400	0,1510	37,1%	0,1560	0,0114	92,7%	23,2000	2,5000	89,2%
24/06/2020	0,2520	0,1560	38,1%	0,1490	0,0130	91,3%	20,7000	3,6800	82,2%
29/07/2020	0,1760	0,1043	40,7%	0,0313	0,0127	59,4%	7,7000	3,1700	58,8%
27/08/2020	0,1480	0,1069	27,8%	0,0428	0,0191	55,4%	5,8000	6,8000	-17,2%
01/10/2020	0,1810	0,0900	50,3%	0,1570	0,0134	91,5%	27,5000	10,5000	61,8%
10/12/2020	0,3020	0,1400	53,6%	0,2050	0,0114	94,4%	28,1000	2,8300	89,9%
28/01/2021	0,2210	0,1450	34,4%	0,0871	0,0114	86,9%	13,9000	3,2400	76,7%
24/03/2021	0,3500	0,1900	45,7%	0,3410	0,0146	95,7%	37,2000	2,7000	92,7%
		Promedio	**40,3%**		**Promedio**	**83,2%**		**Promedio**	**67,7%**
	E. coli (nmp/g)			Coliformes totales (ufc/g)			Enterobacterias totales (ufc/g)		
Fecha	Balsa 1	Balsa 5	Reducción (%)	Balsa 1	Balsa 5	Reducción (%)	Balsa 1	Balsa 5	Reducción (%)
23/04/2020	52000	120	99,8%	56000	140	99,8%	56000	140	99,8%
28/05/2020	690000	2300	99,7%	180000	0	100,0%	630000	110	100,0%
24/06/2020	930000	1300	99,9%	1500000	55	100,0%	1500000	990	99,9%
29/07/2020	150000	120	99,9%	230000	120	99,9%	240000	1500	99,4%
27/08/2020	76000	330	99,6%	71000	280	99,6%	110000	10000	90,9%
01/10/2020	79000	2300	97,1%	6200	70	98,9%	38000	45	99,9%
10/12/2020	140000	3900	97,2%	8700	450	94,8%	150000	2100	98,6%
28/01/2021	32000	3600	88,8%	52000	1800	96,5%	52000	2900	94,4%
24/03/2021	140000	1100	99,2%	35000	24000	31,4%	130000	1800	98,6%

	Promedio	**97,9%**		**Promedio**	**91,2%**		**Promedio**	**97,9%**

En la Tabla 2 se reproducen los resultados de las mediciones obtenidas para nitrógeno total, en la granja de Lorca, para las balsas control y EBD. En dicha tabla se calculan las reducciones en el contenido de nitrógeno total observadas en la balsa EBD con respecto a la balsa control, y se calcula el promedio de las reducciones observadas.

Tabla 2. Mediciones y reducciones observadas en la balsa EBD con respecto a la balsa control, en la granja de Lorca, para nitrógeno total.

	Nitrógeno total (g/L)		
Estación	Control	EBD	Reduc-ción (%)
Verano 21	4,70	1,80	61,7%
Otoño 21	5,70	1,20	78,9%
Primavera 22	4,14	1,69	59,2%
		Promedio	**66,6%**

Como se apreccia, en Lorca se observa un promedio de reducción del contenido de nitrógeno total del 66,6% de la balsa con EBD con respecto a la balsa control; sin embargo, en Pulpí, el promedio de reducción del 40,3% de la balsa 5 con respecto a la balsa 1, ambas provistas de EBD. En la primera medición, en Pulpí se comprobó la diferencia entre el purín de la balsa 1 y el purín previo, directo de las fosas de la granja. En la Tabla 3 se muestra el resultado obtenido, y se calcula la reducción observada de nitrógeno en la balsa 1 con respecto al purín bruto.

Tabla 3. Mediciones en el contenido de nitrógeno, y reducción observada entre la balsa 1 y el purín bruto, en la granja de Pulpí.

	Nitrógeno total (g/L)		
Estación	Fosa	Balsa 1	Reduc-ción (%)
Verano 20	2,70	2,20	18,5%
		Promedio	**18,5%**

4. Discusión

En la granja de Pulpí, se observa que existe una reducción en el contenido de nitrógeno total en la balsa 1 o balsa de recepción con respecto al purín bruto procedente de las fosas de la granja. Ese efecto se debe únicamente al tratamiento

EBD, puesto que en esa balsa no se implanta ningún otro tratamiento. Después de pasar el purín por el proceso de separación de fases, y la fase líquida por el proceso de nitrificación-desnitrificación y decantación, se siguen apreciando reducciones en el contenido de nitrógeno total. El contenido de nitrógeno total en el purín de cerdo varía según factores como el tipo de explotación y la fase de producción, pudiendo rondar entre 3 y 6 g/L [15]. El contenido de nitrógeno total medio de todas las observaciones en la balsa 5 es del orden de 1,4 g/L, con lo que queda patente la reducción en el contenido de nitrógeno total conseguido con la combinación de técnicas implantadas en la granja de Pulpí.

Atendiendo a los resultados obtenidos en la granja de Lorca, igualmente se observa una reducción en el contenido de nitrógeno total en la balsa con tratamiento EBD con respecto a la balsa control. La media de contenido de nitrógeno total en las observaciones realizadas en la balsa control es del orden de 4,9 g/L, que está dentro de la media de los datos esperados [15]; mientras que la media de contenido de nitrógeno total en las observaciones realizadas en la balsa con EBD es del orden de 1,6 g/L, bastante más bajo que en el control, y similar a los valores observados en la balsa 5 de la granja de Pulpí. Así, se puede considerar que el efecto de reducción ce contenido total de nitrógeno en el purín está muy influenciado por el tratamiento EBD.

Estas reducciones en el contenido de nitrógeno total en el purín de cerdo tiene las siguientes connotaciones: **1. Menor riesgo ambiental:** La reducción del contenido de nitrógeno en el purín disminuye el riesgo de contaminación por lixiviación y volatilización, lo que reduce el impacto ambiental asociado a su aplicación agrícola [16]. **2. Reducción del poder fertilizante nitrogenado:** Un menor contenido de nitrógeno en el purín implica que se necesitarán mayores volúmenes para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos, lo que puede aumentar los costos y la logística de aplicación. **3. Incremento del volumen a aplicar:** Para alcanzar los niveles adecuados de nitrógeno requeridos por los cultivos, se incrementará el volumen de purín a aplicar, lo que podría elevar costos logísticos y operativos en su transporte, almacenamiento o aplicación. Sin embargo, desde el punto de vista de la retirada del purín en una granja, supone que se requiere menor superficie para su aplicación. **4. Potencial para aplicaciones específicas:** El purín con menor contenido de nitrógeno es adecuado para su uso en zonas vulnerables a nitratos, donde las regulaciones sobre la aplicación de fertilizantes nitrogenados son más estrictas. Esto permite una gestión más sostenible y reduce el impacto ambiental.

Al igual que el contenido de nitrógeno total del purín de cerdo, su contenido de fósforo total también depende de factores como el tipo de explotación y la fase de producción, estando del orden de 2 y 3 g/L [15]. Las observaciones realizadas en la

granja de Pulpí, en la balsa 1, están de media entre todas las observaciones, del orden de 1,4 g/L, obteniéndose importantes reducciones en la balsa 5, que muestra contenidos de fósforo total, de media en todas las observaciones, del orden de 0,1 g/L. Disponer de purín de cerdo con menor contenido en fósforo total para su valorización como fertilizante orgánico, supone: **1. Menor riesgo de contaminación ambiental:** La reducción del contenido en fósforo en el purín puede disminuir significativamente los riesgos de eutrofización de cuerpos de agua superficiales, ya que el fósforo es uno de los principales nutrientes responsables del crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas [17, 18]. **2. Mayor volumen aplicable en superficies agrícolas limitadas:** Un purín con bajo contenido en fósforo permite la aplicación de mayores volúmenes sin superar los límites normativos ambientales, especialmente en zonas declaradas vulnerables [18].

También se han observado reducciones el en contenido de cinc. La presencia excesiva de cinc y otros metales pesados en los purines puede causar acumulación en el suelo, afectando negativamente su calidad y salud a largo plazo. La reducción de estos contaminantes favorece la conservación y sostenibilidad del suelo agrícola [19]. La reducción de metales pesados en el purín implica un menor riesgo de bioacumulación en cultivos, limitando así la entrada de estos contaminantes en la cadena alimentaria [20]. Un purín tratado con menores niveles de metales pesados mejora su aceptación social, agronómica y normativa como fertilizante orgánico de calidad, favoreciendo su uso sostenible [21]. Al cumplir con normativas ambientales y agronómicas más estrictas relacionadas con metales pesados, el purín tratado puede ser utilizado en una mayor variedad de cultivos y terrenos agrícolas, especialmente en zonas sensibles o vulnerables [22].

Finalmente, y no menos importante, se han comprobado reducciones en el contenido de agentes patógenos, como E.coli, enterobacterias y coliformes. La disminución significativa de patógenos evita riesgos sanitarios en humanos y animales, al reducir la probabilidad de transmisión de enfermedades durante la aplicación agrícola del purín [23]. El uso de purines tratados libres de patógenos mejora la seguridad alimentaria de los cultivos, especialmente importante en aquellos productos hortícolas destinados al consumo directo [24]. La reducción de patógenos mejora significativamente la percepción pública y comercial del purín tratado como un fertilizante orgánico más seguro y aceptable desde el punto de vista sanitario [25]. La eliminación de patógenos facilita el cumplimiento de normativas sanitarias estrictas, permitiendo una aplicación más amplia y con menos restricciones administrativas en distintos tipos de cultivo [26].

5. Conclusiones

Queda demostrado que la instalación de dispositivos EBD en los almacenamientos exteriores de purín consigue una reducción en el contenido de nitrógeno total, de fósforo total, y de metales pesados como el cinc. Al mismo tiempo, se consigue la práctica eliminiación de patógenos, como E. coli, coliformes y enterobacterias.

Con todo, se consigue un purín líquido con muchas aptitudes para su valorización como fertilizante o enmienda orgánica.

Referencias

1. Naciones Unidas, Perspectivas de la población mundial 2022: resumen de resultados. 2022.
2. Montalvo, G., Piñeiro, C., & Herrero, M. Valorización agrícola de purines y sistemas de tratamiento en granja. Suis, (115), 20-28. **2015**.
3. González-Mancilla, A., Rivera-Cruz, M. C., Ortiz-García, C. F., Almaraz-Suárez, J. J., Trujillo-Narcía, A., & Cruz-Navarro, G. Uso de fertilizantes orgánicos para la mejora de propiedades químicas y microbiológicas del suelo y del crecimiento del cítrico Citrange troyer. Universidad y Ciencia, 29(2), 129-144. **2013**.
4. López Mtz., J. D., Díaz Estrada, A., Martínez Rubin, E., & Valdez Cepeda, R. D. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. Terra Latinoamericana, 19(4), 293-299. **2001**.
5. Cuevas, J., Seguel, O., Ellies, A., & Dörner, J. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. Revista Chilena de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, 6(2), 1-15. **2006**.
6. Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., & Fadul-Vasquez, C. J. La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. La Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustrial, 6(1), 58-66. **2019**.
7. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. El estiércol y las prácticas recomendadas para su manejo. **1994**.
8. Comisión Europea. Documento de referencia de las mejores técnicas disponibles (MTD) para la cría intensiva de aves de corral o cerdos. **2017.**
9. Atlas, R.M.; Philip, J. Biorremediación: soluciones microbianas aplicadas para la limpieza ambiental en el mundo real. ASM Press **2005**.
10. Cervantes, C.; Dos Santos, R. Reducción del estrés oxidativo en procesos de biorremediación: una revisión. Applied Microbiology and Biotechnology **2011**, 91 (5), 1121-1132. doi:10.1007/s00253-011-3436-4
11. Carvajal, M.; Hernández, F. J. Informe del proyecto para Agrosolmen sobre la investigación del efecto de EBDs en cebaderos (no publicado). **2023**.
12. Freytech Inc. *https://freytech.com/* (acceso el 5 de enero de 2025).
13. Bartlett, G. History, Theory and Practice of the Electric Telegraph. **1860**.
14. Neosaitec. *https://neosaitec.com/servicios/* (acceso el 19 de junio de 2023).
15. Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació. Adaptación del uso de subproductos ganaderos según criterios agronómicos. RuralCat. Generalitat de Catalunya. **2019**.
16. Belmonte Soto, M. A. Reducción de materia orgánica y nutrientes contenidos en purines de cerdo mediante digestión anaeróbica y tratamiento de nitrificación-desnitrificación. Universidad de Concepción. **2012**.
17. Sharpley, A. N., Jarvie, H. P., Buda, A., May, L., Spears, B., & Kleinman, P. Phosphorus Legacy: Overcoming the Effects of Past Management Practices to Mitigate Future Water Quality Impairment. Journal of Environmental Quality, 42(5), 1308-1326. **2013.** https://doi.org/10.2134/jeq2013.03.0098
18. Kleinman, P. J. A., Sharpley, A. N., Withers, P. J. A., Bergström, L., Johnson, L. T., & Doody, D. G. Implementing agricultural phosphorus science and management to combat eutrophication. Ambio, 44(2), 297-310. **2015**.
19. Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., Abad, M., & Bernal, M. P. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. Biomass and Bioenergy, 40, 181-189. **2012**. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.018

20. Nicholson, F. A., Smith, S. R., Alloway, B. J., Carlton-Smith, C., & Chambers, B. J. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. Science of the Total Environment, 311(1-3), 205-219. **2003**. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00139-6
21. Paradelo, R., & Barral, M. T. Evaluation of the potential capacity as biosorbents of two MSW composts with different Cu, Pb and Zn contents. Bioresource Technology, 104, 810-813. **2012**. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.024
22. Moral, R., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Rufete, B., & Paredes, C. Characterisation of the organic matter pool in manures. Bioresource Technology, 99(16), 7701-7707. **2008.** https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.016
23. Avery, L. M., Killham, K., & Jones, D. L. Survival of Escherichia coli O157:H7 in organic wastes destined for land application. Journal of Applied Microbiology, 98(4), 814-822. **2005**. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2004.02524.x
24. Holvoet, K., Sampers, I., Callens, B., Dewulf, J., & Uyttendaele, M. Moderate prevalence of antimicrobial resistance in Escherichia coli isolates from lettuce, irrigation water, and soil. Applied and Environmental Microbiology, 80(21), 6677-6683. **2014**. https://doi.org/10.1128/AEM.01995-14
25. Vinnerås, B. Comparison of composting, storage and urea treatment for sanitising of faecal matter and manure. Bioresource Technology, 98(17), 3317-3321. **2007**. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.011
26. Gerba, C. P., & Smith, J. E. Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. Journal of Environmental Quality, 34(1), 42-48. **2005**. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0042

Sistema Automatizado de Monitoreo de Puesta en Gallinas Negra Castellana Mediante Sensores de Peso e Infraestructura IoT

Dunia Virto González [1*], María Jesús González Morales [2], Manuel Rodríguez Cayetano [2], Pilar Gutiérrez Martínez [2] e Isabel González Barragán [1].

1 1 Universidad Pontificia Comillas; dvirto@comillas.edu, pilar.gutierrez@inea.edu.es , igbarragan@inea.comillas.edu

2 2 Universidad de Valladolid; gonmor@tel.uva.es, manuel.rodriguez@tel.uva.es

3 Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola INEA. Universidad Pontificia de Comillas.

4 Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación . Universidad de Valladolid

5 * dvirto@comillas.edu

Resumen: La raza autóctona Negra Castellana se encuentra en peligro de extinción y presenta una reducción en su productividad debido a la falta de selección orientada a la mejora de la puesta [1]. Dado que las gallinas se crían en un sistema de semilibertad, el control de la puesta supone un reto en comparación con las gallinas enjaulada. En este contexto, se ha desarrollado un sistema de monitoreo automatizado que permite la identificación individual de las gallinas y el registro de su producción de huevos en tiempo real. El sistema integra tecnología RFID (Radio Frequency Identification) para la identificación de cada ave, sensores infrarrojos para detectar el movimiento de los huevos en la zona de puesta y celdas de carga para medir tanto el peso de la gallina al ingresar al ponedero como el peso del huevo depositado. La combinación de estas tecnologías permite mejorar la precisión en la detección de la puesta y minimizar errores en la identificación. La información recopilada es procesada por un microcontrolador Arduino y almacenada en una base de datos accesible vía WiFi. Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación del sistema, destacando su aplicabilidad en la mejora genética de la raza Negra Castellana y su posible implementación en otros sistemas avícolas.

Keywords: Automatización avícola, monitoreo de puesta, celdas de carga, sensores infrarrojos, Arduino, selección genética, conservación de razas autóctonas.

1. Introducción

La eficiencia productiva de las explotaciones avícolas depende en gran medida de la capacidad de selección de los mejores ejemplares para la reproducción. En el caso de la gallina Negra Castellana, esta selección es compleja debido a la falta de herramientas tecnológicas accesibles que permitan evaluar la productividad

individual de cada ave. La mayoría de los sistemas de monitoreo de puesta existentes están diseñados para explotaciones intensivas en jaulas, donde la identificación y recolección de huevos es más sencilla [2]. Sin embargo, la normativa europea y la demanda de productos más sostenibles han impulsado sistemas de producción alternativos, como la cría en suelo y en sistemas camperos o sistemas ecológicos, donde el control individual de la puesta es más difícil de implementar.

La Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola y Agroambiental INEA perteneciente a la Universidad Pontificia Comillas cuenta con una finca ecológica de 28 hectáreas en Valladolid, donde se desarrolla un proyecto de avicultura ecológica de puesta con un enfoque en razas autóctonas como la gallina Negra Castellana. La explotación incluye un parque de 1500 m² y diversas naves adaptadas para las diferentes etapas del ciclo productivo: cría, recría, puesta y reproducción. En este entorno, se implementó el presente proyecto con el fin de mejorar la monitorización de la producción de huevos y facilitar la selección genética de la raza Negra Castellana.

La gallina Negra Castellana se caracterizaba por ser una de las principales productoras de huevos en España en la primera mitad del siglo XX, alcanzando una producción anual de hasta 225 huevos [3]. Sin embargo, con la llegada de híbridos comerciales como la Leghorn, su uso productivo disminuyó drásticamente, siendo relegada a un papel secundario en la avicultura moderna [4]. La raza está actualmente clasificada como en peligro de extinción según el Catálogo Oficial de Razas de Ganado de España [1].

En la explotación de INEA, la producción de huevos de la gallina Negra Castellana presenta un porcentaje de puesta del 35 %, con una producción anual aproximada de 138 huevos por gallina. Sin embargo, este valor es relativamente bajo en comparación con otras razas comerciales, lo que ha llevado a la necesidad de mejorar la eficiencia del sistema productivo mediante el uso de tecnología avanzada de monitoreo. Para lograrlo, el presente estudio ha diseñado e implementado un sistema automatizado que permite la identificación individual de cada gallina y el registro de su actividad de puesta mediante sensores de peso y detección de movimiento, facilitando la selección de los ejemplares con mayor productividad y contribuyendo a la conservación de la raza.

2. Material y Métodos

Infraestructura del sistema de monitoreo

El sistema se implementó en el gallinero de la Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola y Agroambiental INEA en Valladolid, diseñado para alojar gallinas en un

entorno de cría en suelo. Para la automatización del proceso de recolección de datos, se construyó un ponedero especializado que incluye:

- Estructura modular de ponedero en chapa galvanizada, con acceso controlado para evitar interferencias entre individuos.
- Sensor de identificación RFID de gallina instalado en el ponedero como puede verse en la figura 1 y la respectiva anilla de identificación, figura 2. Ambos son utilizados para reconocer de manera individual a cada ave al ingresar al ponedero, permitiendo un registro preciso de la puesta y asociando cada huevo a la gallina correspondiente., utilizado para confirmar la entrada y permanencia del ave en el ponedero, mejorando la precisión del monitoreo de puesta.
- Celdas de carga HX711, instaladas en la base del ponedero para la medición del peso corporal de la gallina.
- Celdas de carga adicionales en la zona de recolección de huevos, para registrar el peso de cada unidad puesta y evitar falsos positivos en la identificación.
- Sensores infrarrojos, encargados de detectar el paso del huevo desde la zona de puesta a la bandeja de recolección.
- Sistema de adquisición de datos, compuesto por un microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010, encargado de recibir, procesar y enviar la información vía WiFi a una base de datos central.
- Software de monitoreo, desarrollado en Python, que permite la visualización remota y el análisis de los datos recopilados.

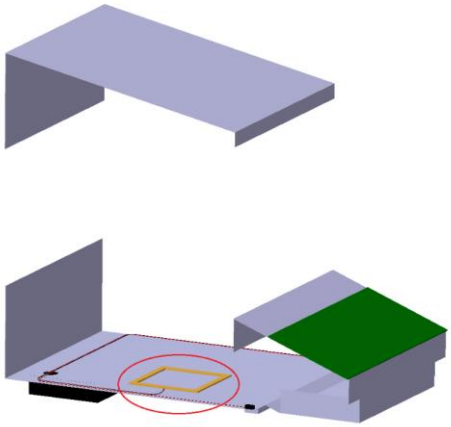


Figura 1: Sensor RFID instalado en el ponedero.

Figura 2: Anilla con etiqueta RFID.

Instalación y pruebas del sistema

La instalación del sistema se llevó a cabo en varias fases:

1. Diseño y ensamblaje del ponedero automatizado: Se construyó la estructura del ponedero en el taller, ensamblando las celdas de carga y los sensores en posiciones estratégicas para minimizar interferencias.

2. Integración de sensores y microcontrolador: Se realizó la conexión de las celdas de carga al módulo HX711 y de los sensores infrarrojos al Arduino MKR WiFi 1010 como puede verse en la figura 3.

3. Desarrollo y prueba del software: Se programó el sistema para adquirir y procesar los datos en tiempo real, utilizando una interfaz en Python para la visualización remota.

4. Calibración de sensores: Se ajustaron las celdas de carga con pesas patrón y se verificó la estabilidad de las mediciones con pruebas repetidas en distintas condiciones ambientales.

5. Validación funcional: Se realizaron pruebas con gallinas en el gallinero, observando el comportamiento de los sensores y ajustando parámetros de detección.

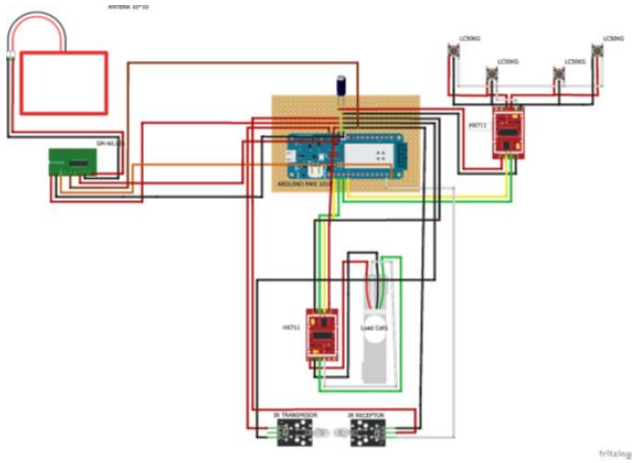


Figura 3: Diagrama de conexiones de los sensores en el ponedero.

Esquema de programación y funcionamiento

El sistema automatizado sigue un esquema de funcionamiento dividido en varias etapas:

1. Detección de la gallina en el ponedero:

   - Al entrar una gallina en el ponedero, el sensor de identificación RFID reconoce individualmente al ave y registra su ID en el sistema.
   - La celda de carga ubicada en la base del ponedero mide su peso y envía los datos al microcontrolador.
   - Se registra la hora, el ID de la gallina y su peso si se encuentra dentro de un umbral previamente calibrado.

2. Monitoreo del proceso de puesta:

- Se activa un temporizador que establece un tiempo mínimo de permanencia en el ponedero antes de considerar que se ha realizado la puesta.
- Si la gallina permanece en el ponedero por más de este umbral, se activa la detección de puesta.

3. Registro de la puesta:

- Cuando el huevo es depositado en la bandeja de recolección, la segunda celda de carga mide su peso.
- Simultáneamente, el sensor infrarrojo verifica que ha ocurrido un movimiento en la dirección esperada.
- Si ambos sensores confirman la detección, se registra la puesta en la base de datos.

4. Envío de datos a la base de datos:

- Una vez validada la puesta, el sistema almacena el peso del huevo, la identificación de la gallina, el peso de la gallina y la hora exacta.
- La información se envía mediante WiFi a una base de datos accesible a través de una aplicación en Python.

5. Análisis de datos y reportes:

- Los datos recopilados pueden ser consultados en tiempo real desde la aplicación.
- Se generan gráficos y reportes con estadísticas de producción por gallina, variaciones en el peso de los huevos y detección de anomalías en la puesta.

Consideraciones de optimización y mejoras futuras

Durante la implementación y pruebas del sistema, se identificaron varias áreas de mejora:

- • Reducción de errores en la identificación de gallinas: A pesar de la integración de la tecnología RFID, en algunos casos se observaron interferencias en la señal, especialmente cuando varias gallinas ingresan al ponedero. Para minimizar estos errores, se plantea la posibilidad de incluir etiquetas RFID de mayor alcance o complementar la identificación con visión artificial, utilizando cámaras y algoritmos de reconocimiento de patrones.
- • Incremento en la precisión de la detección de puesta: Aunque las celdas de carga han demostrado ser efectivas en la identificación del peso del huevo, se ha observado que pequeñas variaciones en la inclinación del ponedero pueden alterar las mediciones. Se recomienda mejorar la calibración de las celdas de carga y complementar el sistema con un sensor adicional de vibración que detecta el impacto del huevo al ser depositado.
- • Evaluación del comportamiento de las gallinas: Se plantea la posibilidad de integrar sensores adicionales para analizar el comportamiento de las aves

dentro del ponedero y su tiempo de permanencia. Esto permitiría identificar posibles problemas de estrés o jerarquía social que puedan estar afectando la producción.

- Con estos ajustes, se espera que el sistema pueda adaptarse a diferentes tipos de explotaciones avícolas y contribuir a la preservación y mejora de la gallina Negra Castellana.

3. Resultados

La implementación del sistema automatizado de monitoreo de puesta en gallinas Negra Castellana se instaló tal como se muestra en la figura 4 y ha permitido recopilar datos sobre la producción de huevos y la identificación individual de cada ave. La combinación de tecnología RFID, celdas de carga y sensores infrarrojos ha permitido la identificación de cada gallina al ingresar al ponedero, su peso corporal y el peso de los huevos depositados, puede verse una muestra de algunos ensayos en la tabla 1. Esto ha facilitado la evaluación entre cada puesta y el ave correspondiente, mejorando la trazabilidad de la producción.

La realización de análisis de los datos recopilados de manera periódica, con ciclos de evaluación semanal, mensual y anual que permitan detectar patrones de producción y variaciones en la puesta serán clave para la selección de reproductores, optimizando así los procesos de mejora genética de la raza. Además, el sistema ha demostrado ser una herramienta efectiva para el monitoreo del bienestar animal, ya que el seguimiento individualizado de cada ave permite detectar posibles problemas de salud o cambios en su comportamiento productivo.

Figura 4: Puesta en marcha de 3 ponederos con el sistema de monitoreo de puesta.

Tabla 1: Muestra de la información inicial que ofrece el monitoreo de puesta.

Hora	Dirección MAC	Ponedero	Evento	ID del ave	Peso (g)
09:44:30	80:7d:3a:86:7d:28	3	Nuevo huevo	6600b9bb83	57.00

09:48:10	84:0d:8e:10:ae:f8	1	Gallina dentro	6600b9c9a6	---
09:56:26	84:0d:8e:10:ae:f8	1	Gallina dentro	6600b9c9a6	---
09:59:19	80:7d:3a:86:7d:28	3	Nuevo huevo	6600b9bb83	51.00
10:03:00	80:7d:3a:86:7d:28	3	Gallina dentro	6600b9a4b6	---
10:09:43	80:7d:3a:86:7d:28	3	Nuevo huevo	6600b9a4b6	56.00
10:16:56	84:0d:8e:10:ae:f8	1	Gallina dentro	6600b9b348	---
10:24:47	80:7d:3a:86:7d:28	3	Nuevo huevo	6600b9a4b6	49.00
20:39:13	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:40:20	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:41:36	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:42:15	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:42:47	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:43:26	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:44:37	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:45:47	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:46:23	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:47:41	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---
20:48:21	24:0a:c4:d4:98:ac	2	Gallina dentro	670012ccb9	---

4. Discusión

Los resultados obtenidos con el sistema de monitoreo han demostrado su viabilidad para el control de la producción en gallinas Negra Castellana. La correcta identificación de la puesta es un factor clave en la mejora genética, ya que permite seleccionar los ejemplares más productivos sin alterar su comportamiento natural.

Uno de los principales retos en sistemas de semilibertad es la diferenciación precisa de los huevos de cada ave, una tarea sencilla en sistemas intensivos con jaulas, pero compleja en explotaciones ecológicas. En este estudio, la combinación de sensores de peso e infrarrojos ha reducido significativamente los errores en la identificación de la puesta, representando un avance en la automatización del control productivo. Sin embargo, aún existen desafíos, como la variabilidad en el comportamiento de las aves y la necesidad de adaptar la tecnología a diferentes condiciones de explotación.

Como futura línea de investigación, se sugiere la implementación de algoritmos de inteligencia artificial para mejorar la predicción de patrones de puesta y detectar anomalías en la producción. Además, sería interesante evaluar otras tecnologías de identificación que permitan una precisión aún mayor.

5. Conclusiones

El sistema automatizado desarrollado ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar el control de la producción de huevos en gallinas Negra Castellana en sistemas de semilibertad.

Los resultados muestran que la combinación de sensores de peso e infrarrojos permite una identificación precisa de la puesta sin alterar el comportamiento natural de las aves. Esto facilita la selección genética y puede contribuir a la conservación de la raza, mejorando su viabilidad económica.

En conclusión, el presente estudio demuestra que la tecnología puede jugar un papel clave en la modernización de la avicultura tradicional sin comprometer el bienestar animal ni la sostenibilidad de las explotaciones. La adopción de estos sistemas podría transformar el manejo de razas autóctonas y su mejora genética.

6. Patentes

Este proyecto ha dado lugar a la concesión del Modelo de Utilidad 202031837, otorgado por la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM). La solicitud fue concedida el 19 de mayo de 2021. Este modelo de utilidad protege el sistema de monitoreo automatizado desarrollado para la identificación y registro de la puesta en gallinas, basado en sensores de peso e infrarrojos, y su integración con sistemas de adquisición de datos y transmisión remota.

Bibliografía

1. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. Catálogo Oficial de Razas de Ganado de España. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/zootecnia/razas-ganaderas/razas/catalogo-razas/ (Consultado el 21 de marzo de 2025).
2. Asociación Nacional de Criadores de Gallinas de Raza Castellana Negra (GANECA). Programa de conservación de la gallina Castellana Negra. Disponible en: https://ganeca.org/wordpress/wp-content/uploads/2020/08/Anexo-II-Programa-de-conservaci%C3%B3n-Castellana-Negra-julio.pdf (Consultado el 21 de marzo de 2025).
3. Orozco, F. (1975). La recuperación de la gallina Negra Castellana. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA).
4. GANECA. Historia y características de la gallina Castellana Negra. Disponible en: https://ganeca.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/4A-CastellanaNegra-Orozco.pdf (Consultado el 21 de marzo de 2025).

PARTE 11

PROJETOS, MEIO AMBIENTE E TERRITÓRIO

PROYECTOS, MEDIO AMBIENTE Y TERRITORIO

Índice

AgriPampa - Agriculture and Livestock Production in the Pampas "Prevention of incidents in Agricultural Environments" 1137

Nano-delivery Systems for Plant-derived Antifungals: A Sustainable Approach to Gray Mold Control 1148

Nanoencapsulated Botanical Extracts for Disease Management in Horticultural Crops: Focus on Sugar Beet Pathogens 1160

Chitosan-based Nanocarriers Loaded with Natural Plant Extracts: A Promising Strategy for Controlling Fusarium Wilt of Banana Caused by Foc TR4 and STR4 1176

Capsicum Secondary Metabolites: A Sustainable Approach for Controlling Soil-borne Diseases in Cucurbits 1190

Comparación de métodos clásicos de valoración de arbolado urbano con análisis estadístico 1203

Acompañamiento a productores de borojó (Borojoa patinoi Cuatrecasas) en Buchadó, Chocó biogegráfico, Colombia 1215

Do urban agricultural initiatives meet the needs of local authorities? - A Multi-Method Analysis 1231

Modelação do volume de chorume produzido por matrizes, nas fases de maternidade e gestação, no Brasil: uma abordagem inicial 1243

GHG emissions using different methodologies in cashew cultivation 1255

An Evaluation on Potential Social Impacts of Circular Agriculture: A Social LCA Approach 1266

Estudo do comportamento agronómico de variedades de arroz: importância para as regiões produtoras 1277

Evaluación del efecto de la aplicación exógena de prolina como mitigador del estrés salino en Physalis ixocarpa Brot. 1287

Estimación de curvas de absorción foliar de Calcio, Magnesio y Azufre en arveja (Pisum sativum L.) Samacá-Boyacá-Colombia 1302

Knowledge Transfer for Sustainable Agriculture: Insights from the TANGO Circular Project 1314

AgriPampa - Agriculture and Livestock Production in the Pampas "Prevention of incidents in Agricultural Environments"

Diogo Kersten[1], Jhon Cornélio[2], Luis Armas[2], Cleber Rodrigues[2], Rafaela Dornelles[2] and Felipi Sobral[2]

1 Kersten 1; e-mail diogosilveira@unipampa.edu.br

2 Cornélio 2; e-mail jhoncornelio@unipampa.edu.br

2 Armas 2; e-mail luisarmas@unipampa.edu.br

2 Rodrigues 2; e-mail cleberrodrigues@unipampa.edu.br

2 Dornelles 2; e-mail rafaeladornelles@unipampa.edu.br

2 Sobral 2; e-mail felipisobral@unipampa.edu.br

Abstract: AgriPampa is being developed in the municipality of Alegrete/RS/Brazil, a city that plays a central role as a catalyst for regional development. It is a project that relies on a multidisciplinary approach in the context of family farming, with a focus on technological innovation and efficiency in agricultural practices, to solve concrete challenges faced by rural producers in the region. Among the challenges are high rainfall that causes constant flooding of the rivers that make up the Ibicuí River basin, erosion in agricultural environments, crop losses, among others. AgriPampa promotes sustainable methods that can mitigate some of the impacts of climate change, such as the cultivation of crops that are resistant to adverse weather conditions and the adoption of techniques that preserve the soil and biodiversity, based on family farming. The adoption of techniques that preserve the soil, such as direct planting, contour planting, and biodiversity, such as research focused on the production of graphene from sheep wool, residual straw from rice crops, and rice husks, with the purpose of returning it to the production cycle, i.e., incorporating graphene into the soil. These methods are supported by the use of low-cost management technologies and agricultural machinery that are easy for farmers to acquire. To this end, a laboratory is important for producing technologies, obtaining data, and evaluating solutions in agricultural environments, in addition to produced and characterized graphene from various types of agricultural waste, i.e., an unwanted environmental liability in the agricultural production cycle. In this way, AgriPampa will contribute to the management of soil, water, and plants on each rural property registered in the project, encouraging the consumptive use of natural resources and adopting new technologies such as the insertion of graphene in the form of fertilizer, obtained from the rural property itself.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3 (List three to ten pertinent keywords specific to the article yet reasonably common within the subject discipline.)

1. Introdução

O presente trabalho visa a adoção de uma abordagem multidisciplinar no contexto da agricultura familiar, principalmente com foco na inovação tecnológica e busca pela eficiência em práticas agropecuárias, para viabilizar os principais desafios enfrentados pelos produtores rurais, na região da Fronteira Oeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Dentre eles, podemos citar: as cheias constantes dos rios que integram a bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, os fortes temporais com ventos acima de 100 km.h-1, erosões dos solos provocadas pelas altas precipitações, perdas de safras, entre outros. E ainda possibilitar a prevenção de possíveis incidentes em ambientes agrícolas relacionados a esses desafios. Buscamos promover métodos sustentáveis, que possam mitigar os impactos das mudanças climáticas. Como o cultivo de culturas resistentes à condições climáticas adversas, a adoção de técnicas que preservem o solo e a biodiversidade, como por exemplo o sistema de plantio direto, a implantação de curvas de nível em áreas declivosas e a identificação de áreas vulneráveis aos riscos climáticos. Esses métodos são complementados pelo uso de tecnologias, que utilizam imagens aéreas captadas por drone e satélite [1,2], também pela utilização de insumos biosustentáveis como a aplicação de agroquímicos de baixo impacto ambiental e ainda a adesão da prática de rotação de culturas. A metodologia que será utilizada é projetada para alinhar cada uma das quatro metas físicas, sendo:

A primeira meta envolve a expansão da infraestrutura do AgriPampa, projeto já em operação pela instituição promotora, Unipampa, com foco em consultoria especializada em atender grupos de famílias de baixa renda. Com a aquisição e instalação de equipamentos laborais, softwares e materiais necessários para implementar as novas tecnologias em ambientes agropecuários. As atividades nessa fase incluem o cadastro das propriedades rurais, com a coleta de informações de alguns indicadores físicos, que abrangem a quantidade de equipamentos instalados e o número de propriedades integradas ao sistema AgriPampa;

A segunda meta é o desenvolvimento de soluções baseadas na aptidão do uso do solo em cada propriedade, a análise de imagens de drone e satelitais, somada à identificação das atividades agropecuárias irão auxiliar a realização da recomendação técnica mais adequada para cada produtor. Para isso serão realizadas visitas técnicas para a coleta de amostras e dados, do solo e da planta, para posterior análise em laboratório. Os indicadores físicos para essa meta incluem o número de modelos desenvolvidos e a precisão dos mesmos em testes de campo;

A terceira meta é a capacitação dos agricultores familiares no uso das tecnologias (novas e subjacentes), através da realização de workshops e treinamentos, possibilitando assim uma melhor compreensão dos fenômenos físicos naturais que ocorrem na região.

Por fim, a quarta meta é a síntese, caracterização e produção de grafeno à partir de diversos tipos de resíduos agrícolas e animais, tais como: palha e casca de arroz, serragem de madeira, capim annoni, casca de nozes e a lã de ovelha. Este produto, o grafeno, será aplicado na agricultura, possibilitando a avaliação da resposta das plantas e dos diversos tipos do solo, tal como reportado por outros autores, ao usar grafeno comercial [3-7].

O que oportuniza, através do acompanhamento técnico um assessoramento para alavancagem dos negócios empreendidos em sistemas de produção, através de visitas técnicas, realizando o diagnóstico e prognóstico de suas atividades agropecuárias [8]. Neste ambiente serão oferecidos serviços para a comunidade externa sendo eles:

Ações de alavancagem da agricultura familiar com adoção de técnicas conservacionistas, empregando a mão de obra e equipamentos já existentes nas propriedades, incentivando a realização de cursos técnicos com foco em desenvolvimento, sustentabilidade e inovação;

Serviços de consultoria técnica para o desenvolvimento de arranjo produtivo local, para aspectos como manejo adequado do solo/planta, manejo do rebanho ovino e bovino;

Elaboração de estratégia para o atendimento das demandas por níveis de prioridade, após realizado o cadastro e obtido informações técnicas precisas da propriedade, busca-se atender as demandas mais urgentes, como os problemas de erosão, manejo adequado do solo e a identificação dos passivos e destinação adequada dos mesmos, que para o presente projeto servirão de substrato no processo de produção de grafeno;

Auxílio técnico no Cadastro Ambiental Rural (CAR), orientações para realização de georreferenciamento de imóveis rurais, melhorias no manejo de culturas anuais e rebanho ovino; pesquisa e produção de grafeno para uso experimental. Após as visitas técnicas e coleta dos passivos agrícolas para o trabalho em laboratório, iniciaremos o processo de produção do grafeno, no qual ir-se-á realizar análises físico-químicas do material, averiguando então a viabilidade do produto. Obtendo resultados favoráveis para implantação em cultivos agrícolas, o grafeno retornará para a propriedade como insumo para a nova etapa do projeto; realização de

mapeamento topográfico com RTK (Real-time Kinematic) e modelagem 3D nas propriedades cadastradas, a partir de imageamento com drone e imagens satelitais, com foco em identificar as possíveis áreas de inundação ou mesmo focos erosão que possam prejudicar a produtividade agropecuária.

2. Materias e Métodos

O AgriPampa é um trabalho que está sendo desenvolvido no âmbito do Centro de Inovação do Pampa, considerando quatro metas principais: Ampliação da infraestrutura tecnológica, a partir da aquisição de equipamentos complementares aos laboratórios das instituições envolvidas, para dar continuidade às pesquisas com grafeno como aquisição de fornos com fluxo e sem fluxo de gás, estufas, dessecador, agitador vortex para a sínteses, caracterização e produção de grafeno, drone e câmeras para monitoramento ambiental, sensor que trabalha na banda do infravermelho próximo para identificar a qualidade das culturas a campo, além de computadores e microscópio eletrônico que darão o apoio necessário às atividades desenvolvidas nos laboratórios;

Está sendo desenvolvido soluções inovadoras com passivos ambientais na produção do grafeno, e suas possíveis aplicações em ambientes com problemas de perdas de nutrientes e erosões, a partir da palha do arroz, resíduos culturais como a lã de ovelha e plantas consideradas pragas invasoras dos campos agrícolas (capim annoni, buva);

Capacitação com transferência de novas tecnologias aos produtores rurais que desempenham trabalhos artesanais e familiares, dentre eles estão as comunidades quilombolas e assentamentos; identificar alternativas para o uso e consequente comércio da lã grossa é uma necessidade extrema para a sustentabilidade da ovinocultura. Considerando que a tosquia é imperativa nos sistemas de produção, este manejo apresenta um custo ao produtor.

A inviabilidade do comércio da lã gera um prejuízo financeiro, um problema de estocagem e um desestímulo ao produtor, especialmente para os pequenos empreendedores, que tem na safra de lã como uma alternativa de combate à sazonalidade de receita. Sendo assim, a solução apresentada no presente trabalho pode se tornar uma ferramenta de agregação de valor à cadeia produtiva, gerando uma possibilidade de comércio certo para esta rica fibra natural que também é fruto do árduo trabalho do homem no campo. Regionalmente, a pesquisa ajudará a enfrentar desafios específicos da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul e áreas similares, como a necessidade de diversificação de cultivos e a eficiência no uso do solo e da água, em proposição as constantes cheias que danificam os ambientes de

produção agropecuária. A seguir é apresentado na figura 01 identificação de áreas produtivas que são constantemente atingidas por cheias do rio Ibicuí - RS.

Figura 01. Áreas de produção agropecuária próximas ao rio Ibicuí que são constantemente atingidas pelas cheias do rio.

A implementação das tecnologias pode servir como um modelo para outras regiões com características semelhantes, promovendo a inovação e a adoção de práticas agrícolas avançadas em larga escala como exemplo: Nas áreas de agricultura e meio ambiente, o uso do grafeno é promissor na remoção de agroquímicos agrícolas em águas contaminadas. As ligações químicas e espessura do grafeno são responsáveis por diversas propriedades importantes desse elemento, como resistência mecânica e condutividades térmica e elétrica. E, devido às suas inúmeras propriedades, o grafeno atrai cientistas e a indústria tecnológica por suas infinitas possibilidades de uso.

Uma infraestrutura expandida permitirá a integração sinérgica de ações de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) envolvendo as áreas agrícola e laboratorial. Essa simbiose entre as áreas multidisciplinares dos pesquisadores, atrai talentos e motivará a criação de soluções para problemas práticos sofridos pela agricultura familiar.

O AgriPampa irá proporcionar a inovação tecnológica somada à sustentabilidade na agricultura familiar, que é a base econômica de muitas comunidades rurais na cidade de Alegrete/RS e o Pampa Gaúcho. A aplicação de tecnologias avançadas e práticas de gestão eficiente contribui diretamente para a melhoria das condições de vida dos produtores rurais, aumentando a produtividade e a renda, além de promover práticas sustentáveis que preservam os recursos naturais através de consultorias técnicas no campo. O projeto apoia e encontra respaldo na Política de Inovação das duas instituições envolvidas, que estabelece normas e diretrizes para gestão ambiental [9,10].

O Município de Alegrete está localizado na região denominada Metade Sul do Rio Grande do Sul - Brasil, por muitas vezes denominada a região com maior carência no desenvolvimento econômico e social do Estado. A população rural deste município é de aproximadamente 8 mil habitantes, correspondendo a mais de 10% dos 72 mil habitantes locais [11]. As atividades agrícolas empreendidas no contexto destacado geram impactos a médio e longo prazo para a preservação da biodiversidade no ecossistema caracterizado pelo Bioma Pampa. Este preâmbulo nos permite contextualizar a complexidade e diversidade do que se constitui como agricultura familiar nesta Região.

Para organizarmos as definições das demandas locais para desenvolvimento, buscamos o apoio e informações junto aos principais atores de desenvolvimento local através do Conselho Municipal de Desenvolvimento Agropecuário, da Secretaria Municipal de Agricultura e Pecuária, da Emater/ASCAR, Sindicato Rural de Alegrete, da Pilecco Nobre, da Associação dos Arrozeiros, e da Comunidade Quilombola do Angico, parceiros nesse trabalho. Desta forma, o projeto vai impactar diretamente os produtores familiares (de pequeno e médio porte) organizados em grupos sociais distribuídos em diversas localidades. Inicialmente, o projeto prevê incluir 30 famílias atendidas nas localidades denominadas pelas entidades referidas, como Capivari, Jacaraí, Caverá, Lageadinho, Pinheiros, Passo Novo, Durasnal, Jacaquá, Lageado Grande, Itapevi, Rincão do 28, Mariano Pinto, Comunidade Quilombola do Angico, Assentamento Unidos Pela Terra e Assentamento Novo Alegrete. Os serviços que estão sendo prestados para as famílias visam a melhoria da qualidade de vida, a geração e manutenção de postos de trabalho no campo, atração e retenção de talentos, a agregação de renda nas comunidades rurais, e preservação dos recursos naturais produtivos.

A diversificação dos meios de produção, o georreferenciamento voltado a agregação de valor ao produto local, preservação dos recursos naturais e tecnologias de reaproveitamento de resíduos da agricultura e pecuária são o foco das ações em benefício das comunidades. Na maior parte das localidade citadas é praticada atualmente a agricultura de subsistência, produção de hortaliças, fruticultura, a pecuária de corte e a pecuária de leite.

Para destacar onde prevemos gerar o maior impacto, em termos de desenvolvimento no arranjo produtivo local, elencamos quatro destas comunidades, cuja produção é predominantemente de subsistência: Jacaraí, Comunidade quilombola do Angico, Assentamento Unidos Pela Terra e Assentamento Novo Alegrete. Através dos Laboratórios para Agricultura Familiar, inseridos na instituição promotora, iremos elaborar as melhores práticas de desenvolvimento no âmbito econômico, através do uso de tecnologias que

otimizam o controle dos insumos da produção, no âmbito social e ambiental, pois iremos difundir junto às famílias práticas produtivas que intensificam o reaproveitamento e a recirculação da água, bem como o aproveitamento dos resíduos agrícolas. Estes resíduos agrícolas como a palha do arroz e a lã de ovelha, será usado na síntese, caracterização e produção de grafeno para ser aplicado na melhora da produção dos alimentos agrícolas, tais como soja, milho, arroz, diversos tipos de hortaliças, entre outros, quando o grafeno é incorporado no solo.

Deve-se ressaltar que além dos resíduos agrícolas também pretende-se usar o capim annoni, o qual é considerado uma invasora dos campos agrícolas em diversas regiões do Brasil. O grafeno produzido a partir dos resíduos agrícolas será caracterizado usando diversas técnicas de caracterização, tais como: espectroscopia Raman, Microscopia eletrônica de varredura (MEV), FTIR, difração de raios X (DRX), espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), Microscopia eletrônica de transmissão (MET), CHN entre outras.

3. Resultados

O trabalho prevê resultados para alcançar uma série de iniciativas e fomentar a sustentabilidade no âmbito da agricultura familiar, através da inovação no Bioma Pampa, sendo eles:

- Registro do Negócio e de Ativos para obter ganhos ecossistêmicos;
- Marcas e Domínios: Registro adequado de marcas e domínios na internet para proteger a identidade do AgriPampa e dos produtores familiares e fortalecer sua presença digital agregando valor ao ecossistema;
- Propriedade Intelectual: Proteção de inovações, tecnologias desenvolvidas e metodologias exclusivas do programa e compartilhamento da propriedade intelectual com os produtores;
- Governança Ambiental, Social e Corporativa (ESG) para obter valorização da sociobiodiversidade; Melhores Práticas de ESG: Adotar um plano de governança baseado nas melhores práticas de ESG, garantindo que todas as operações do projeto estejam alinhadas com princípios de sustentabilidade ambiental, responsabilidade social e governança corporativa;
- Relatórios e Transparência; Desenvolver um sistema de relatórios periódicos de sustentabilidade, proporcionando transparência e responsabilidade aos envolvidos; Apoio especial para grupos prioritários, especialmente comunidades Quilombolas e Assentamentos inseridos no município de Alegrete, onde desenvolvem atividades artesanais, em ambientes separados, o qual necessita de assistência técnica especializada para alavancar suas atividades econômicas;
- No âmbito da agricultura, promover uso de sistemas produtivos inovadores, Sistemas Agroflorestais (SAFs) [12], Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), agricultura [13] sem solo que cada propriedade familiar possa

desenvolver, identificando sempre a sua vocação agropecuária, através de visitas técnicas com reconhecimento de solo, planta e topografia;

- Recursos hídricos: Equilibrar a necessidade de produção agrícola com a conservação dos recursos hídricos [14], sem comprometer a produtividade e a qualidade dos produtos; Escalonamento de culturas:

A diversificação agrícola [15] contribui para a melhoria da qualidade do solo, assim como reduz as emissões de gases de efeito estufa, alinhado com o aumento da produtividade e a rentabilidade de forma sustentável, através da incorporação de grafeno obtidos com passivos agrícola ou animal, como a lã ovina; Incentivar a formação de uma comunidade ativa de desenvolvedores e usuários, promovendo a troca de conhecimentos e o aprimoramento contínuo das soluções implementadas a partir de workshops e palestras envolvidas pelo projeto.

Nos últimos anos, a reutilização de resíduos agrícolas têm despertado grande interesse em vários aspectos ambientais e industriais. Em particular, no que se refere à produção de grafeno e suas potenciais aplicações nas diversas áreas da ciência e da indústria, devido a que os resíduos agrícolas são uma fonte rica em vários materiais, tais como: sílica, carbono, zeólito e outros minerais em menor quantidade. Por exemplo, a casca de arroz é um resíduo agrícola que está disponível de forma abundante na região oeste do estado do Rio Grande do Sul - Brasil. Muitas vezes, em diversos lugares, grandes quantidades de casca de arroz são simplesmente descartadas, queimadas no campo a céu aberto, contaminando o ambiente.

Quando a casca de arroz é queimada, a cinza remanescente da casca é muito rica em sílica e carbono, com percentuais que podem chegar a mais de 80%. Razão pela qual, desde o ponto técnico-científico se faz necessário saber, qual a melhor temperatura e tempo de queima para produzir cinza de casca de arroz com maior porcentagem de carbono para a produção de grafeno. Outro resíduo agrícola, oriundo da região Sul e causante de prejuízos aos plantios agrícolas e contaminação ambiental, é o capim annoni, devido a que muitas vezes se mistura com outras culturas agrícolas, atrapalhando o crescimento e produção destes. Razão pela qual, torna-se de grande interesse por alternativas sustentáveis de destinação do capim annoni, culminando, então, em sua retirada dos campos e áreas de pastagens. De forma semelhante a utilização da lã ovina está sendo reduzida pelas indústrias têxteis, sendo portanto necessário encontrar um destino adequado sem contaminar o ambiente. Embora a lã seja 100% biodegradável, o problema mais citado é sua pegada de gases de efeito estufa. Isso ocorre porque as ovelhas, devido à sua digestão natural do pasto, produzem metano, um gás de efeito estufa, o qual contamina o ambiente. Surge a necessidade de saber a possibilidade de obter grafeno de boa qualidade a partir da lã de ovelha. Portanto, com o desenvolvimento

de estudos técnico-científicos visando-se o emprego da lã de ovelha como matéria precursora para obtenção de novos materiais, ricos em carbono (grafeno, por exemplo, para ser aplicado na agricultura), ou ricos em componentes inorgânicos, estar-se-ia contribuindo com o desenvolvimento tecnológico e de inovação do país, assim como com a preservação dos recursos naturais produtivos.

Resultados relacionados com a produção do grafeno a partir da cinza de casca de arroz (CCA) são mostrados na Figura 02. Na Fig. 02 (a) mostra-se a casca de arroz, a qual foi queimada na temperatura e tempo de 400°C e 60 min, obtendo-se a CCA (Fig. 02(b). Posteriormente esta CCA foi misturada com o reagente químico hidróxido de sódio (KOH) e queimada na temperatura e tempo de 850°C e 60 min, obtendo se o grafeno (Fig. 02(c)). Posteriormente o grafeno obtido foi caracterizado por espectroscopia Raman, tal como mostrado na Fig. 02(d). Nesta figura, mostra-se as bandas características do grafeno, tais como: A banda D localizada em ~ 1350 cm^{-1} , a banda G localizada em ~ 1580 cm^{-1} e a banda 2D localizada em ~ 2670 cm^{-1}. É bem sabido que a banda D é devido à desordem, a banda G devido à ligação carbono-carbono, em tanto que a banda 2D surge devido a um processo de dupla ressonância.

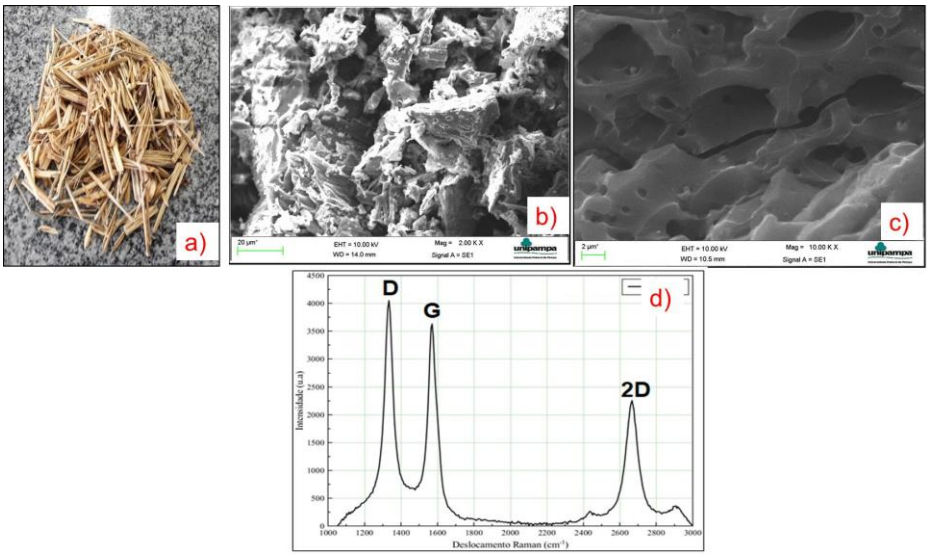


Figura 02 - Produção do grafeno a partir da casca de arroz. (a) casca de arroz, (b) cinza de casca de arroz, (c) grafeno produzido e (d) Espectro Raman do grafeno produzido com suas bandas características (D, G e 2D).

4. Discussão

O fortalecimento à pesquisa científica e inovação é inerente ao desenvolvimento da presente proposta, que contribui para a melhoria da qualidade do solo, assim como reduz as emissões de gases de efeito estufa, alinhado com o aumento da produtividade e a rentabilidade de forma sustentável nas propriedades rurais estudadas. Proporcionando pesquisa, inovação e ciência a acadêmicos de

graduação e pós-graduação que estarão trabalhando em ambientes de produção agropecuária como também na sínteses, caracterização e produção de grafeno nas diversas áreas de Engenharia, em particular na Engenharia agrícola. De forma semelhante, sua aplicação na Engenharia elétrica, através da fabricação de dispositivos de armazenamento de energia, tais como supercapacitores e baterias, aplicação na qual os proponentes desta proposta já vem trabalhando.

Resultados desta proposta mostram que é possível produzir grafeno a partir da cinza de casca de arroz, assim como devem gerar patentes, visto que grafeno produzido a partir de biomassas consideradas pragas invasoras dos campos agrícolas, ainda não é muito difundido. Por exemplo, recentemente obteve-se uma patente depositada sobre a produção de grafeno a partir da biomassa capim santa fé, e uma nova em fase de avaliação, relacionada com a aplicabilidade do grafeno produzido a partir da biomassa capim annoni, no incremento das propriedades mecânicas de matrizes cimentícias. Em conjunto com alunos de graduação e pós-graduação, também estamos aplicando o grafeno produzido a partir da biomassa capim annoni no incremento das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas de ligas de Alumínio com grafeno. De acordo com o exposto, com o aumento das áreas de aplicação do grafeno produzido, espera-se continuar aumentando o número de pesquisadores, o que levaria ao aumento do número de publicações de artigos em periódicos de mediano e alto fator de impacto, assim como também ao aumento do número de patentes. Portanto, acredita-se que com o desenvolvimento da presente proposta estar-se-ia contribuindo com o incentivo à pesquisa científica e inovação, o que levaria ao desenvolvimento da região Pampa do Sul do Brasil. Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação nacionais nos países em desenvolvimento, inclusive garantindo um ambiente político propício para, entre outras coisas, a diversificação industrial e a agregação de valor às commodities.

Referências

1. [1] Carvalho, Fernando K. ; Chechetto, Rodolfo G. ; Mota, Alisson A. B. ; Antuniassi, Ulisses R. . Challenges of Aircraft and Drone Spray Applications. Outlooks on Pest Management , v. 31, p. 83-88, 2020.
2. [2] Luchetti, Alexandre. Utilização de drones na agricultura: impactos no setor sucroalcooleiro. Ciências Aeronáuticas-Unisul Virtual, 2019.
3. [3] S. Wang, Y. Liu, X. Wang, H. Xiang, D. Kong, N. Wei, Wei Guo and H. Sun. Effects of concentration-dependent graphene on maize seedling development and soil nutrients. Sci. Rep. 13, 2650 (2023).
4. [4] L. Xiu, et al. Biochar can improve biological nitrogen fxation by altering the root growth strategy of soybean in Albic soil. Sci. Total Environ. 773, 144564 (2021).
5. [5] S. Zhang, et al. Enhanced phosphorus mobility in a calcareous soil with organic amendments additions: Insights from a long term study with equal phosphorus input. J. Environ. Manage. 306, 114451 (2022).

6. [6] G. M. Shah, et al. Nano agrochemical zinc oxide infuences microbial activity, carbon, and nitrogen cycling of applied manures in the soil-plant system. Environ. Pollut. 293, 118559 (2022).
7. [7] R. Wilfredo, D. R. Roberta, et al . Influence of multilayers Bernal and Rhombohedral graphene obtained by green chemistry on the acceleration in the germination process of tomato seeds. Diamond and Related Materials, 145, 111077 (2024).
8. [8] Brasil. L 9433. Lei Nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
9. [9]Campos, Lucila Maria de Souza; Melo, Daiane Aparecida de. Indicadores de desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. Production, v. 18, p. 540 555, 2008.
10. [10] Da Costa Borba, Marcelo et al. Gestão no meio agrícola com o apoio da Inteligência Artificial: uma análise da digitalização da agricultura. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 15, n. 3, p. 1-22, 2022.
11. [11] www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/alegrete.html, acesso 29 de outubro de 2024.
12. [12] Camargo, Giseli Mendonça et al. Sistemas agroflorestais biodiversos: uma alternativa para pequenas propriedades rurais. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 15, n. 1, 2019.
13. [13] Flores, Murilo Xavier et al. Pesquisa para agricultura auto-sustentável. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 29, n. 1, p. 1-21, 2020.
14. [14] L. Alessandrino, Nicolò Colombani, et al. Performance of graphene and traditional soil improvers in limiting nutrients and heavy metals leaching from a sandi Calcisol, Science of The Total Environment, 858, 1, 159806 (2023).
15. [15] Ghidini, R.; Mormul, N. M. Revolução agrícola neolítica e o surgimento do Estado classista: breve reconstituição histórica. Revista de Ciências do Estado, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 1?20, 2020. DOI: 10.35699/2525-8036.2020.19725. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/revice/article/view/e19725. Acesso em: 24 out. 2024.

Nano-delivery Systems for Plant-derived Antifungals: A Sustainable Approach to Gray Mold Control

Eva Sánchez-Hernández [1], Javier García-Martín [2,3], Francisca L. Díez-Gutiérrez [1], Alberto Santiago-Aliste [4], Marina Jambrina-González [2,3], Jesús Martín-Gil [1], José Casanova-Gascón [5], Pablo Martín-Ramos [1,*]

[1] Department of Agricultural and Forestry Engineering, ETSIIAA, University of Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, Spain

[2] Beronia Rueda (González Byass), Camino de la Peña s/n, 47490 Rueda, Valladolid, Spain

[3] Dominio Fournier (González Byass), Finca El Pinar, Berlangas de Roa, 09316 Berlangas de Roa, Burgos, Spain

[4] Department of Construction and Agronomy, E. Politécnica Superior Zamora, University of Salamanca, Av. Requejo 33, 49029 Zamora, Spain

[5] Instituto Agroalimentario de Aragón—IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte s/n, 22071 Huesca, Spain

* Correspondence: pmr@uva.es

Abstract: Winegrowers and the wine industry face continuous challenges from fungal diseases, particularly gray mold caused by *Botrytis cinerea* Pers. Although conventional fungicides provide effective control, increasing concerns about fungicide resistance and environmental impact drive the search for sustainable alternatives. This research evaluates the effectiveness of two innovative chitosan oligomers-based nanocarrier systems loaded with plant-derived antifungal compounds from dyer's madder (*Rubia tinctorum* L.) and cat's claw (*Uncaria tomentosa* (Willd. ex Schult.) DC.) extracts. Laboratory assays demonstrated significant pathogen inhibition, with COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* showing superior performance (minimum inhibitory concentration, MIC = 250 µg/mL) compared to COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* (MIC = 375 µg/mL). *Ex-situ* tests on 'Tempranillo' and 'Verdejo' grape varieties confirmed effective protection at higher concentrations (MIC×3). Field trials at D.O.P. Ribera de Duero validated the superior effectiveness of nanoencapsulated formulations (68.8–77.5%) compared to both non-encapsulated extracts (50.0–56.3%) and commercial chitosan (53.8%). The treatments exhibited no phytotoxicity symptoms and integrated compatibly with current vineyard practices without affecting wine organoleptic properties. These findings demonstrate that nanoencapsulation technology offers an eco-friendly, effective alternative to conventional fungicides for sustainable gray mold management in viticulture.

Keywords: biopolymers, *Botrytis cinerea*, nanotechnology, natural products, sustainable viticulture

1. Introduction

Botrytis cinerea Pers. is the main cause of gray mold in vineyards, one of the most serious diseases affecting grapevine cultivation. The management of this disease

represents a significant challenge for the wine industry, as it is responsible for 30-40% of fruit losses under favorable climatic conditions [1]. Due to its specific lifestyle on the plant, attacking grape clusters with high specificity just before their final ripening prior to harvest, *B. cinerea* decreases both the quantity and quality of fruits and leads to the modification of the chemical composition of grapes. Additionally, the fungus produces toxic compounds that can cause fermentation inhibition, affecting the quality of the final product [2].

From an economic perspective, *B. cinerea* infection can have very detrimental consequences for grape growers and winemakers. Its presence decreases crop yield by more than 25%. Considering average trends, it can be estimated that 35% of infected berries after harvest results in a 28.5% reduction in wine volume [3]. Grapes attacked by *B. cinerea* show significant changes in their chemical composition, largely depending on the nature and degree of fungal infection [4]. Regarding the impact on oenological quality, sensory analyses highlight a loss of sensory quality of wine that is perceptible from a threshold as low as 5% of botrytized grapes [3].

Until two decades ago, the control of *B. cinerea* was largely based on the use of synthetic chemical products, which often had to be applied in a temporal sequence very close to harvest. However, strict regulations have been imposed limiting the use of such chemicals because of their ease of dissemination and the emergence of fungal resistance to them, as well as increased surveillance of their negative effects on human health and the environment. As alternatives, pathogen biocontrol strategies have been proposed, mostly centered on the use of microbial antagonists (both prokaryotic and eukaryotic) belonging to genera such as *Trichoderma* spp., *Ulocladium* spp., *Bacillus* spp., or plant extracts and their essential oils [5].

Although biofungicides have good prospects for the management of many important and widespread pathogens, including gray mold, there are limitations to their use and efficacy under field conditions. In the case of biocontrol agents, successes achieved at laboratory scale have generally not been extrapolated to field conditions. The living entities employed are affected by adverse microclimate conditions (including existing conditions in different plant organs and tissues, specific bioclimatic factors affecting each crop, or competition with previously established microbial communities in the agroecosystem), and have demanding requirements regarding transport, storage, and use.

On the other hand, plant-derived natural products (PNPs), such as the basic substances contemplated in Art. 23 of Regulation (EC) No. 1107/2009, also present problems of stability, solubility, and lack of specificity, which limit their effectiveness.

An approach to overcome these limitations and maximize the efficacy of these products is micro/nanoencapsulation [6].

Nanotechnology offers promising applications in agriculture, aiming to increase crop production while reducing environmental impact. Nanocarriers (NCs) enable the efficient transport of biologically active molecules, minimizing the required amount of bioactive compounds and allowing for controlled release over time. The working hypothesis of this research is that the encapsulation of PNPs in NCs can be an enabling technology for the control of *B. cinerea* in vines, resulting in greater efficiency in the control of biotic stress, without detriment to wine production, and contributing to the sustainability of the wine industry as a whole.

This study aimed to evaluate the effectiveness against *B. cinerea* of chitosan-based NCs loaded with *Rubia tinctorum* L. and *Uncaria tomentosa* (Willd. ex Schult.) DC. extracts through *in vitro*, *ex-situ*, and field trials.

2. Materials and Methods

2.1. Fungal Isolates

The fungal isolate used in this study was *Botrytis cinerea* (isolated from strawberry). The isolate was maintained on potato dextrose agar (PDA) at 4 °C and subcultured every two months.

2.2. Plant Material and Preparation of Extracts

Rubia tinctorum specimens used for the preparation of the bioactive extract were collected from the banks of the Carrión River as it passes through the town of Palencia (Spain). The preparation and characterization of the hydromethanolic extract were performed following the methodology described by Langa-Lomba *et al.* [7]. *Uncaria tomentosa* bark specimens were collected in La Merced (Chanchamayo, Peru). The aqueous ammonia extract was prepared according to the method described by Sánchez-Hernández *et al.* [8]. The phytochemical profiles of both plant extracts have been previously characterized and reported in the aforementioned studies [7,8].

2.3. Synthesis and Characterization of Nanocarriers

The preparation of COS-*g*-C_3N_4 NCs was performed as described in [9] and in Spanish patent ES2958909 (international patent WO 2024/018098 A1). The COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs were prepared following the procedure described in [10] and in Spanish patent application P202330435 (WO 2024/246386 A1).

For the encapsulation of *R. tinctorum* extract in COS-*g*-C_3N_4 NCs, 105 mg of the lyophilized extract was added to the NC solution to obtain a COS:*g*-C_3N_4:*R. tinctorum* 1:0.5:0.25 weight ratio. The mixture was subjected to sonication for 1 h while maintaining the temperature below 60 °C and the pH at 4-5 [9].

For the encapsulation of *U. tomentosa* extract in COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs, 210 mg of the lyophilized extract was redissolved in methanol and added to the NC solution, resulting in a COS:HAp:*g*-C_3N_4:*U. tomentosa* weight ratio of 2:1:0.5:1. The mixture was sonicated for 1 h in 10 min intervals while maintaining a temperature below 60°C and a pH of 4-5 [10].

The nanocarriers, both empty and loaded with plant extracts, were characterized using transmission electron microscopy (TEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray powder diffraction (XRPD), as described in previous studies [9,10]. The encapsulation efficiency (EE) was determined using an indirect method, calculating the difference between the initial amount of extract and the non-encapsulated extract present in the supernatant after centrifugation. The release efficiency (RE) was assessed by measuring the amount of extract released after enzymatic degradation of the NCs using chitosanase.

2.4. In Vitro Antifungal Assays

The antifungal activity of both types of NCs loaded with the plant extracts —along with those of the non-encapsulated extracts, for comparison purposes— was evaluated against *B. cinerea* using the agar dilution method, according to EUCAST antifungal susceptibility testing standard procedures. Stock solutions of the treatments were incorporated into potato dextrose agar (PDA) medium to achieve concentrations ranging from 62.5 to 1500 µg/mL. Fungal mycelium plugs (5 mm diameter) from the margins of 1-week-old PDA cultures were transferred to plates containing the specified concentrations for each treatment. Three plates per treatment/concentration combination were prepared, with two replicates each. The plates were incubated at 25 °C in the dark for 1 week.

The mycelial growth was evaluated by measuring the average of two colony diameters perpendicular to each other for each repetition. Growth inhibition was determined using the formula: Inhibition (%) = $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, where d_c and d_t represent the mean colony diameter of the untreated control and the treated fungal colony, respectively. The minimum inhibitory concentration (MIC) was defined as the lowest concentration of the tested compound resulting in complete inhibition of visible fungal growth.

2.5. Ex Situ Effectiveness Tests

The effectiveness of NC treatments was determined by artificial inoculation on 'Tempranillo' and 'Verdejo' grape varieties, adapting the methodology described by Buzón-Durán *et al.* [11]. Grape bunches of uniform size, color, and shape were selected to ensure homogeneous lots, all checked to be free of lesions. The tests were carried out in triplicate. At the beginning of the tests, grapes were superficially disinfected with a 3% NaOCl solution for 2 min, washed three times with sterile distilled water, and dried in a laminar flow hood using sterile absorbent paper. In this state, the negative control grapes (no fungus and no treatment) were set aside.

Subsequently, the grape bunches were sprayed with the respective treatments (viz. COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* and COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* at concentrations of MIC, MIC×2, and MIC×3). Once dry, 2 mm cuts were made on the berries with a sterile entomological pin, which were then inoculated with 10 µL of a conidia suspension (10^6 conidia/mL). Some untreated grapes were reserved for cuts and the addition of conidia, using them as positive controls (with fungus and without treatment).

The grapes were then stored in a chamber at 22 °C with a relative humidity of 90%, i.e., under conditions suitable for the development of *B. cinerea*. The trial lasted 12 days. During this time, the progression of fungal infection was monitored using a scale from 0 to 4, where 0 = no visible symptoms; 1 = slight symptoms (small spots); 2 = moderate symptoms (spots covering up to 25% of the berry); 3 = severe symptoms (25-50% of the berry affected); and 4 = very severe symptoms (>50% of the berry affected or complete colonization).

2.6. Field Trials

Field trials were conducted in 'Tempranillo' vineyards (the most susceptible variety) at Dominio Fournier winery (coordinates: 41.701252, -3.887265; Berlangas de Roa, Burgos, Spain), which belongs to the P.D.O. Ribera de Duero, using a randomized complete block design. Both non-encapsulated extracts and encapsulated treatments were tested, at a MIC×3 dose, along with commercial chitosan hydrochloride 2.5% (SANCO 12388/2013; Alltech Spain, Almoguera, Guadalajara, Spain) and an untreated control. Applications were made using a backpack sprayer, with 10 plants per repetition and 4 repetitions per treatment, for a total of 40 plants per treatment. Treatments were randomly assigned within each block to minimize the effects of environmental gradients in the vineyard. Applications were carried out on September 21, 2024, and September 28, 2024. Harvest took place on October 4, 2024.

The severity of *B. cinerea* infection in grape clusters was assessed using the standardized visual assessment methodology by Hill *et al.* [12]. For each treatment, 100 clusters (25 clusters per repetition × 4 repetitions) were evaluated at harvest time (October 4, 2024). The severity was estimated by visually determining the percentage of the visible area of each cluster affected by *B. cinerea*, considering only areas with evident sporulation. A severity assessment key similar to that described by Hill *et al.* [12] was used to assist in the accuracy of visual assessments, with reference images showing 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, and 90% infected area.

For each treatment, the mean severity was calculated by averaging the severity values from all assessed clusters. The effectiveness of each treatment was calculated using Abbott's formula:

Effectiveness (%) = [(Severity in control - Severity in treatment) / Severity in control] × 100

3. Results and Discussion

3.1. Nanocarrier Characterization

The characterization of both NC systems has been previously reported in detail [9,10]. Briefly, TEM analysis of COS-*g*-C_3N_4 NCs showed spherical particles with an average diameter of 85.5 ± 21.3 nm and a dispersity index of 0.25, while COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs exhibited a slightly larger average diameter of 250 ± 84.4 nm with a dispersity index of 0.34, indicating monodispersity in both cases. The encapsulation efficiency of *R. tinctorum* extract in COS-*g*-C_3N_4 was determined to be 95–97%, while *U. tomentosa* extract showed an encapsulation efficiency of 82% in COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs. Release efficiency upon enzymatic degradation with chitosanase was 74–81% for *R. tinctorum* extract and 84–89% for *U. tomentosa* extract.

3.2. In vitro Antifungal Activity

The minimum inhibitory concentrations (MICs) determined for the unencapsulated plant extracts and the NCs loaded with plant extracts against *B. cinerea* are presented in Table 1. To compare the efficacy of encapsulated plant extracts with their free-form equivalents, equivalent MICs were calculated based on the weight ratios of components in each NC formulation (approximately 14.3% for *R. tinctorum* and 22.2% for *U. tomentosa*).

Table 1. Minimum inhibitory concentrations (MIC, µg/mL) of unencapsulated plant extracts and nanocarrier formulations against *B. cinerea*. Values in brackets indicate the equivalent concentration of encapsulated plant extract corresponding to the nanocarrier MIC.

Treatment	***R. tinctorum* extract**	***U. tomentosa* extract**	**COS-g-C_3N_4-*R. tinctorum***	**COS-HAp-g-C_3N_4-*U. tomentosa***
MIC	93.75	375	375 (53.6)	250 (55.6)

The results demonstrate that both unencapsulated extracts and nanocarrier (NC) formulations exhibited significant antifungal activity against *B. cinerea*. When comparing the equivalent extract concentrations in NCs to their unencapsulated counterparts, a notable enhancement in efficacy was observed, particularly for *U. tomentosa* extract, where the equivalent MIC dropped substantially from 375 µg/mL in free form to 55.6 µg/mL when nanoencapsulated. Although *R. tinctorum* extract also showed improved efficacy when encapsulated (53.6 µg/mL compared to 93.75 µg/mL in free form), this enhancement was less pronounced than that observed with *U. tomentosa*. These improvements can be attributed to the protective properties of the nanocarriers, which shield bioactive compounds from degradation while potentially enhancing their bioavailability and facilitating more efficient interaction with fungal target sites. Additionally, the enhanced antifungal activity may result from the synergistic effect between the plant extracts and chitosan oligomers (COS), which possess inherent antimicrobial properties that complement the bioactive compounds, as discussed in more detail below.

3.3. Ex-situ Grape Protection

The results of the ex-situ effectiveness tests on 'Tempranillo' and 'Verdejo' grapes are presented in Table 2. The progression of fungal infection was evaluated on days 2, 5, 7, and 12 after inoculation.

It should be noted that even the negative control grapes, which were not artificially inoculated with *B. cinerea*, showed progressive development of gray mold symptoms throughout the experiment period. This can be attributed to the presence of latent *B. cinerea* infections in the field-collected grape clusters before the experiment. While the surface disinfection procedure with 3% NaOCl was effective in reducing the external fungal load, it could not eliminate deeply established latent infections that are typical in vineyard conditions. This observation highlights the ubiquitous nature of *B. cinerea* in vineyard environments and the challenges of completely eliminating natural infections, even under controlled experimental conditions. The difference between negative controls and positive controls still demonstrates the additional infection pressure from artificial inoculation, validating the experimental approach.

For 'Tempranillo' grapes, significant differences among treatments were observed from day 5 onwards. At day 7, both COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* at MIC×3 and COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* at MIC×2 and MIC×3 showed significantly lower infection severity compared to the positive control. By day 12, only COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* at MIC×3 maintained significantly lower disease severity than the positive control.

For 'Verdejo' grapes, significant differences were observed on days 5 and 7, but not on day 12. On day 7, COS-g-C_3N_4-*R. tinctorum* at MIC×3 showed the lowest infection severity.

Table 2. Severity of *B. cinerea* infection on 'Tempranillo' and 'Verdejo' grapes treated with different formulations. Data represent least-squares means of disease severity scores (scale 0-4) evaluated on different days after inoculation. Different letters within columns indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($p \leq 0.05$) following ANOVA.

Treatment	'Tempranillo'				'Verdejo'			
	Day 2	Day 5	Day 7	Day 12	Day 2	Day 5	Day 7	Day 12
Negative control	0.333 a	1.333 ab	2.333 ab	3.667 ab	0.000 a	0.000 b	0.667 ab	3.333 a
Positive control	0.667 a	2.667 a	3.667 a	4.000 a	0.000 a	0.667 ab	1.667 ab	4.000 a
COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum*, MIC	0.333 a	1.333 ab	2.333 ab	4.000 a	0.333 a	1.333 a	2.333 ab	4.000 a
COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum*, MIC×2	0.333 a	1.333 ab	2.333 ab	4.000 a	0.000 a	0.333 ab	1.333 ab	4.000 a
COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum*, MIC×3	0.000 a	0.667 b	0.667 b	3.333 ab	0.333 a	0.333 ab	0.333 b	3.333 a
COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa*, MIC	0.667 a	1.000 b	2.333 ab	4.000 a	0.333 a	0.667 ab	2.667 a	4.000 a
COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa*, MIC×2	0.000 a	0.667 b	1.333 b	4.000 a	0.000 a	0.000 b	0.667 ab	4.000 a
COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa*, MIC×3	0.000 a	0.333 b	1.333 b	3.000 b	0.000 a	0.000 b	1.000 ab	3.667 a
Pr > F(Model)	0.401	0.003	0.002	0.002	0.661	0.029	0.012	0.086
Significant	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No

Figure 1 shows representative images of 'Tempranillo' and 'Verdejo' grape bunches after treatment with different formulations and inoculation with B. cinerea.

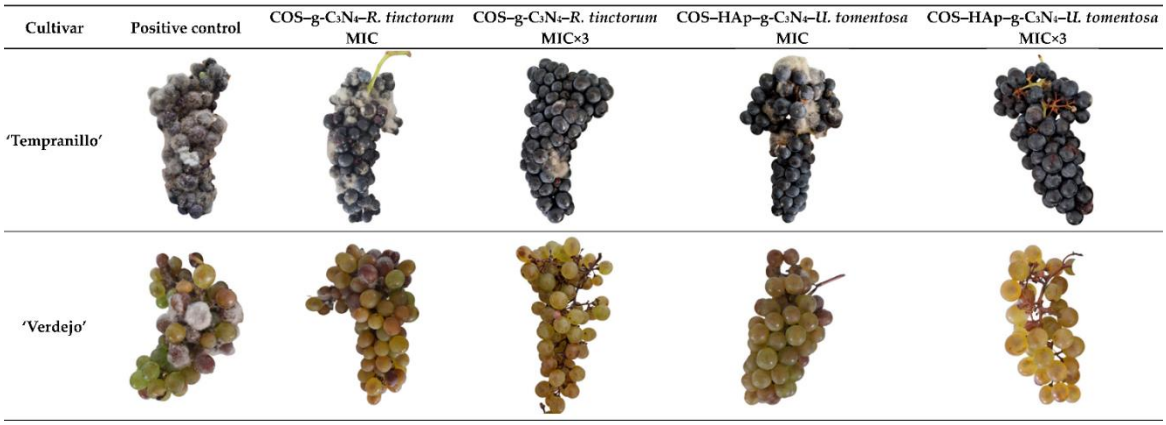


Figure 1. Representative images of 'Tempranillo' (*top row*) and 'Verdejo' (*bottom row*) grape bunches 7 days after inoculation with *B. cinerea* and treatment with different formulations.

Overall, the *ex-situ* tests demonstrated that both nanocarrier systems provided protection against *B. cinerea* in the early stages of infection, with better results at higher concentrations (MIC×3). However, by day 12, most treatments showed similar levels of infection to the positive control, indicating that the protective effect diminished over time. This suggests that under the highly favorable conditions for fungal growth used in these tests, repeated applications would be necessary for long-term protection.

3.4. Field Trial Results

The results of the field trials conducted at Dominio Fournier vineyard on 'Tempranillo' grapevines are presented in Table 3.

Table 3. **Severity of *B. cinerea* infection (% affected area) in 'Tempranillo' grape clusters after field application of different treatments and their effectiveness.**

Treatment	Untreated control	*R. tinctorum* extract	*U. tomentosa* extract	Commercial chitosan	COS-g-C_3N_4-*R. tinctorum*	COS-HAp-g-C_3N_4-*U. tomentosa*
Incidence (%)	80	40	35	37	25	18
Effectiveness (%)	-	50.0	56.3	53.8	68.8	77.5

The field trial results demonstrated that all treatments significantly reduced the severity of *B. cinerea* infection compared to the untreated control. The nanoencapsulated formulations provided superior protection, with COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* showing the highest effectiveness (77.5%) against bunch rot. COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* also exhibited strong protective effects with 68.8% effectiveness. The non-encapsulated plant extracts provided moderate protection, with *U. tomentosa* and *R. tinctorum* extracts showing effectiveness values of 56.3% and 50.0%, respectively. Commercial chitosan showed comparable effectiveness (53.8%) to the non-encapsulated extracts.

These results confirm that nanoencapsulated plant extracts substantially outperform both their non-encapsulated counterparts and commercial chitosan under field conditions. The enhanced effectiveness can be attributed to the protective effect of nanocarriers on bioactive compounds, controlled release properties, and potentially improved adhesion to grape surfaces during vineyard conditions.

3.5. Mode of Action and Advantages of Nanocarrier Systems

The enhanced efficacy of plant extracts when delivered through nanocarrier systems can be attributed to several factors. First, the nanocarriers protect the bioactive compounds from degradation due to environmental factors such as UV radiation, heat, and oxidation, thereby extending their effective lifespan. Second, they improve the water solubility and bioavailability of the typically hydrophobic plant secondary metabolites, enhancing their interaction with the target pathogens. Third, they provide a controlled release mechanism that maintains effective concentrations of the bioactive compounds over extended periods, reducing the need for frequent applications [13-16].

In the case of chitosan-based nanocarriers, the chitosan component itself contributes to the overall antimicrobial activity through various mechanisms, including disruption of fungal cell membranes, chelation of essential nutrients, and inhibition of fungal spore germination [17]. This synergistic action between the carrier material and the carried bioactive compounds likely contributes to the observed efficacy of the nanocarrier formulations.

The bioactive compounds present in *R. tinctorum* and *U. tomentosa* extracts have been previously characterized [7,8]. *R. tinctorum* contains anthraquinones and phenols, which have demonstrated antifungal activity through mechanisms including disruption of cell membrane integrity and inhibition of enzymatic processes [7]. *U. tomentosa* contains alkaloids, quinovic acid glycosides, and polyphenols that exhibit antimicrobial activity through multiple mechanisms, including inhibition of cell wall synthesis and disruption of membrane function [8].

The combination of these bioactive compounds with the multifunctional nanocarrier systems developed in this study results in a comprehensive crop protection approach that addresses multiple aspects of pathogen control while minimizing environmental impact. The controlled release properties of the nanocarriers ensure that effective concentrations of the bioactive compounds are maintained at the target site, even under challenging environmental conditions.

4. Conclusions

This study demonstrates the effectiveness of chitosan-based nanocarriers loaded with plant extracts as sustainable alternatives for *B. cinerea* control in viticulture. Both nanocarrier systems exhibited significant antifungal activity, with COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* showing superior performance (MIC = 250 µg/mL) compared to COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* (MIC = 375 µg/mL).

Ex-situ tests revealed that higher concentrations of both nanocarrier systems (MIC×3) provided significant protection in early infection stages, though protection diminished over time under highly favorable conditions for fungal growth. Field trials confirmed the superior performance of nanoencapsulated plant extracts, with COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* providing the highest protection (77.5% effectiveness).

The enhanced efficacy can be attributed to the protective effects on bioactive compounds, improved bioavailability, controlled release properties, and synergistic antimicrobial action of chitosan. These nanocarrier systems represent a significant advancement in sustainable viticulture by offering an eco-friendly alternative to conventional fungicides without compromising effectiveness.

Future research should focus on optimizing application strategies under different environmental conditions, investigating long-term effects on vine health and wine quality, and scaling up production for commercial implementation. Additionally, cost-effectiveness analysis and regulatory pathways for registration as plant protection products should be explored to facilitate market adoption by grape growers worldwide.

Author Contributions: Conceptualization, E.S.-H. and P.M.-R.; methodology, J.G.-M., and J.C.-G.; validation, M.J.-G. and J.C.-G.; formal analysis, E.S.-H. and P.M.-R.; investigation, E.S.-H., J.G.-M., F.L.D.-G., A.S.-A., M.J.-G., J.M.-G., J.C.-G., and P.M.-R.; resources, M.J.-G. and J.M.-G.; writing—original draft preparation, E.S.-H. and P.M.-R.; writing—review and editing, E.S.-H. and P.M.-R.; visualization, E.S.-H.; supervision, P.M.-R.; project administration, J.M.-G. and P.M.-R.; funding acquisition, J.M.-G. and P.M.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Junta de Castilla y León under project VA148P23, co-financed by the European Regional Development Fund.

Acknowledgments: The authors would like to thank the technical staff of Dominio Fournier winery for their assistance during the field trials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Kasfi, K.; Taheri, P.; Jafarpour, B.; Tarighi, S. Identification of epiphytic yeasts and bacteria with potential for biocontrol of grey mold disease on table grapes caused by *Botrytis cinerea*. *Spanish Journal of Agricultural Research* **2018**, *16*, e1002, doi:10.5424/sjar/2018161-11378.
2. Steel, C.C.; Blackman, J.W.; Schmidtke, L.M. Grapevine bunch rots: Impacts on wine composition, quality, and potential procedures for the removal of wine faults. *J. Agric. Food. Chem.* **2013**, *61*, 5189-5206, doi:10.1021/jf400641r.
3. Ky, I.; Lorrain, B.; Jourdes, M.; Pasquier, G.; Fermaud, M.; GÉNy, L.; Rey, P.; Doneche, B.; Teissedre, P.L. Assessment of grey mould (*Botrytis cinerea*) impact on phenolic and sensory quality of Bordeaux grapes, musts and wines for two consecutive vintages. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **2012**, *18*, 215-226, doi:10.1111/j.1755-0238.2012.00191.x.
4. Cioch, M.; Semik-Szczurak, D.; Skoneczny, S. Botrytis and wine production. In *Winemaking*, Joshi, V.K., Ray, R.C., Eds. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2021; 10.1201/9781351034265pp. 166-190.
5. Abbey, J.A.; Percival, D.; Abbey, L.; Asiedu, S.K.; Prithiviraj, B.; Schilder, A. Biofungicides as alternative to synthetic fungicide control of grey mould (*Botrytis cinerea*) – prospects and challenges. *Biocontrol Science and Technology* **2018**, *29*, 207–228, doi:10.1080/09583157.2018.1548574.
6. Stan, D.; Enciu, A.M.; Mateescu, A.L.; Ion, A.C.; Brezeanu, A.C.; Stan, D.; Tanase, C. Natural compounds with antimicrobial and antiviral effect and nanocarriers used for their transportation. *Front Pharmacol* **2021**, *12*, 723233, doi:10.3389/fphar.2021.723233.
7. Langa-Lomba, N.; Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Activity of anthracenediones and flavoring phenols in hydromethanolic extracts of *Rubia tinctorum* against grapevine phytopathogenic fungi. *Plants* **2021**, *10*, 1527, doi:10.3390/plants10081527.
8. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J.; Santiago-Aliste, A.; Hernández-Navarro, S.; Oliveira, R.; González-García, V. Bark extract of *Uncaria tomentosa* L. for the control of strawberry phytopathogens. *Horticulturae* **2022**, *8*, 672, doi:10.3390/horticulturae8080672.
9. Santiago-Aliste, A.; Sánchez-Hernández, E.; Langa-Lomba, N.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Multifunctional nanocarriers based on chitosan oligomers and graphitic carbon nitride assembly. *Materials* **2022**, *15*, 8981, doi:10.3390/ma15248981.
10. Santiago-Aliste, A.; Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; Marcos-Robles, J.L.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. *Uncaria tomentosa*-loaded chitosan oligomers–hydroxyapatite–carbon nitride nanocarriers for postharvest fruit protection. *Agronomy* **2023**, *13*, 2189, doi:10.3390/agronomy13092189.
11. Buzón-Durán, L.; Sánchez-Hernández, E.; Sánchez-Báscones, M.; García-González, M.C.; Hernández-Navarro, S.; Correa-Guimarães, A.; Martín-Ramos, P. A coating based on bioactive compounds from *Streptomyces* spp. and chitosan oligomers to control *Botrytis cinerea* preserves the quality and improves the shelf life of table grapes. *Plants* **2023**, *12*, 577, doi:10.3390/plants12030577.
12. Hill, G.N.; Beresford, R.M.; Evans, K.J. Tools for accurate assessment of botrytis bunch rot (*Botrytis cinerea*) on wine grapes. *New Zealand Plant Protection* **2010**, *63*, 174-181, doi:10.30843/nzpp.2010.63.6560.
13. Pinto, T.V.; Silva, C.A.; Siquenique, S.; Learmonth, D.A. Micro- and nanocarriers for encapsulation of biological plant protection agents: A systematic literature review. *ACS Agricultural Science & Technology* **2022**, *2*, 838–857, doi:10.1021/acsagscitech.2c00113.
14. Pan, X.; Guo, X.; Zhai, T.; Zhang, D.; Rao, W.; Cao, F.; Guan, X. Nanobiopesticides in sustainable agriculture: developments, challenges, and perspectives. *Environmental Science: Nano* **2023**, *10*, 41-61, doi:10.1039/d2en00605g.
15. Yin, J.; Su, X.; Yan, S.; Shen, J. Multifunctional nanoparticles and nanopesticides in agricultural application. *Nanomaterials* **2023**, *13*, 1255, doi:10.3390/nano13071255.
16. Tao, R.; You, C.; Qu, Q.; Zhang, X.; Deng, Y.; Ma, W.; Huang, C. Recent advances in the design of controlled- and sustained-release micro/nanocarriers of pesticide. *Environmental Science: Nano* **2023**, *10*, 351–371, doi:10.1039/d2en00446a.
17. Ma, Z.; Garrido-Maestu, A.; Jeong, K.C. Application, mode of action, and in vivo activity of chitosan and its micro- and nanoparticles as antimicrobial agents: A review. *Carbohydr. Polym.* **2017**, *176*, 257–265, doi:10.1016/j.carbpol.2017.08.082.

Nanoencapsulated Botanical Extracts for Disease Management in Horticultural Crops: Focus on Sugar Beet Pathogens

Rubén Celada-Caminero [1,2], Eva Sánchez-Hernández [1,*], Manuel Gutiérrez-Sosa [2], Alberto Santiago-Aliste [3], Jesús Martín-Gil [1], José Luis Marcos-Robles [4], Vicente González-García [5], Luis Manuel Navas-Gracia [1], and Pablo Martín-Ramos [1]

[1] Department of Agricultural and Forestry Engineering, ETSIIAA, University of Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, Spain

[2] Association for the Improvement of Sugar Beet Cultivation (AIMCRA), Calle de Villabañez 201, 47017 Valladolid, Spain

[3] Department of Construction and Agronomy, E. Politécnica Superior Zamora, University of Salamanca, Av. Requejo 33, 49029 Zamora, Spain

[4] Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Graphic Engineering, Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Mechanical Engineering, and Manufacturing Process Engineering, ETSIIAA, University of Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, Spain

[5] Biopesticides Group: Biotechnology and Chemistry of Natural Products, Department of Plant Protection, ICA-CSIC, C/ Serrano 115 Dup., 28006 Madrid, Spain

* Correspondence: eva.sanchez.hernandez@uva.es

Abstract: Nanotechnology offers promising applications in agriculture, aiming to increase crop production while reducing environmental impact. Nanocarriers (NCs) enable the efficient transport of biologically active molecules, minimizing the required amount of bioactive compounds and allowing for controlled release over time. This study presents the results of using chitosan-based NCs to deliver natural compounds, specifically extracts of dyer's madder (*Rubia tinctorum* L.) and cat's claw (*Uncaria tomentosa* (Willd. ex Schult.) DC.), for the effective and sustainable control of phytopathogens in horticultural crops. The efficacy of NC-based treatments was demonstrated *in vitro* and in controlled efficacy assays (*ex-situ* or *in vivo*) against horticultural pathogens *Botrytis cinerea* Pers., *Cercospora beticola* Sacc., *Rhizoctonia solani* Kühn, and *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary. Mycelial growth inhibition values ranged from 125 to 375 µg/mL for NCs loaded with *R. tinctorum* extract and from 187.5 to 500 µg/mL for those with *U. tomentosa* extract. Complete plant protection of artificially inoculated sugar beet and carrot plants under controlled conditions was achieved at doses ranging from 250 to 1000 µg/mL, depending on the pathogen. Field tests conducted on sugar beet during the 2024 growing season at AIMCRA's (Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera) testing plots at San Román de Hornija (Valladolid, Spain) yielded promising results for *C. beticola* control, with NC treatments showing 40-41% effectiveness against the fungal disease, significantly outperforming organic farming alternatives (12%) and approaching the efficacy of conventional fungicide programs (48%), while causing no phytotoxicity symptoms. These findings demonstrate that nanoencapsulated plant extracts represent a viable alternative to conventional fungicides in sugar beet production, offering a sustainable path toward reducing synthetic chemical inputs while maintaining acceptable crop protection efficiency.

Keywords: horticultural crops; nanotechnology; natural products; sugar beet; carrot; biocontrol

1. Introduction

Horticultural crops, particularly sugar beet and carrot, are of significant economic importance worldwide but face substantial threats from various fungal pathogens that can cause severe yield losses. In Europe, sugar beet (*Beta vulgaris* L.) crops are mainly affected by *Cercospora beticola* Sacc., causing Cercospora leaf spot disease, which can lead to yield losses of up to 40% in severe cases [1]. Additionally, *Rhizoctonia solani* Kühn (causing crown and root rot) and *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary (causing white mold) pose serious threats to sugar beet production [2,3]. Similarly, carrots (*Daucus carota* L.) are susceptible to *Botrytis cinerea* Pers. (causing gray mold), which can cause significant post-harvest losses, as well as to *R. solani* and *S. sclerotiorum*, which cause crater rot lesions on stored carrots and damping-off in seedlings, and significant losses both in the field and during storage, respectively [4].

Conventional management of these pathogens has primarily relied on synthetic fungicides. However, concerns related to environmental impact, residue accumulation, and the development of resistant pathogen strains have led to increasing restrictions on the use of chemical pesticides in agricultural production. According to European Union regulations, many active substances have been banned or their use has been significantly limited in recent years [5]. This regulatory context, coupled with growing consumer demand for more sustainable and environmentally friendly agricultural practices, highlights the need for alternative crop protection strategies.

1.1. Plant-derived Natural Products for Crop Protection

Plant extracts contain a diverse array of secondary metabolites with antimicrobial properties, offering promising alternatives to synthetic fungicides. These natural compounds often present complex mixtures of bioactive molecules that can act through multiple mechanisms, thereby reducing the risk of resistance development [6]. Among the various plant sources that have shown potential for crop protection, *Rubia tinctorum* L. (dyer's madder) and *Uncaria tomentosa* (Willd. ex Schult.) DC. (cat's claw) have demonstrated significant antimicrobial activity.

Rubia tinctorum, traditionally used as a natural dye source, contains anthraquinones (primarily alizarin and purpurin) that have shown antifungal activity against various plant pathogens [7]. Similarly, *U. tomentosa* bark, known for its medicinal properties

in traditional Peruvian medicine, contains alkaloids, quinovic acid glycosides, and polyphenols with documented antimicrobial activity [8].

Despite their promising antimicrobial properties, the direct application of plant extracts in agricultural settings faces several challenges, including rapid degradation of active compounds upon exposure to environmental factors (light, heat, oxygen), limited bioavailability, and poor water solubility. These limitations significantly reduce their effectiveness under field conditions, particularly against soil-borne pathogens.

1.2. Nanotechnology for Enhanced Delivery of Bioactive Compounds

Nanotechnology offers innovative approaches to address the limitations of conventional plant extract applications in agriculture. Nanocarriers (NCs) can protect bioactive compounds from degradation, enhance their solubility and bioavailability, allow for controlled release, and enable targeted delivery to specific sites [9]. These properties can significantly improve the efficacy of natural antimicrobial compounds while minimizing the required dosage, thereby reducing potential environmental impacts.

Among the various types of nanomaterials used in agricultural applications, chitosan-based NCs have garnered particular interest due to chitosan's biodegradability, biocompatibility, and inherent antimicrobial properties [10].

Recent advancements in NC design have led to the development of more complex systems incorporating additional components to enhance functionality. Graphitic carbon nitride (*g*-C_3N_4), a two-dimensional material with unique properties including high photocatalytic activity and biocompatibility, has been successfully combined with chitosan to create multifunctional NCs [11]. Similarly, hydroxyapatite (HAp), a calcium phosphate mineral, has been incorporated into NC systems to improve stability and provide sustained release capabilities [12]. These systems can protect the encapsulated natural extracts from degradation while allowing for their controlled release in response to specific environmental triggers.

1.3. Objectives of the Study

Given the challenges facing horticultural crop protection and the potential of nanotechnology-enabled delivery of natural antimicrobials, this study aimed to: (1) evaluate the *in vitro* antifungal activity of chitosan-based NC systems loaded with extracts from *R. tinctorum* and *U. tomentosa* against key horticultural pathogens: *B. cinerea*, *C. beticola*, *R. solani*, and *S. sclerotiorum*; (2) assess the efficacy of the NC treatments in *ex-situ* experiments using artificially inoculated sugar beet and carrot

plants under controlled conditions; and (3) validate the performance of the most promising NC formulations under field conditions in sugar beet cultivation.

The overarching goal of this research was to develop sustainable alternatives to conventional fungicides for horticultural crop protection, with a particular focus on sugar beet pathogens, contributing to more environmentally friendly agricultural practices while maintaining crop production efficiency.

2. Materials and Methods

2.1. Fungal Isolates

The fungal isolates used in this study were *B. cinerea* (isolated from strawberry), *C. beticola*, and *R. solani* (isolated from sugar beet), and *S. sclerotiorum* (isolated from carrot). All isolates were maintained on potato dextrose agar (PDA) at 4 °C and subcultured every two months.

2.2. Plant Material and Preparation of Extracts

Rubia tinctorum specimens used for the preparation of the bioactive extract were collected from the banks of the Carrión River as it passes through the town of Palencia (Spain). The preparation and characterization of the hydromethanolic extract were performed following the methodology described by Langa-Lomba *et al.* [7]. *Uncaria tomentosa* bark specimens were collected in La Merced (Chanchamayo, Peru). The aqueous ammonia extract was prepared according to the method described by Sánchez-Hernández *et al.* [8]. The phytochemical profiles of both plant extracts have been previously characterized and reported in the aforementioned studies [7,8].

2.3. Synthesis and Characterization of Nanocarriers

The preparation of COS-*g*-C_3N_4 NCs was performed as described in Santiago-Aliste *et al.* [11] and in Spanish patent ES2958909 (international patent WO 2024/018098 A1). The COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs were prepared following the procedure described in [12] and in Spanish patent application P202330435 (WO 2024/246386 A1).

For the encapsulation of *R. tinctorum* extract in COS-*g*-C_3N_4 NCs, 105 mg of the lyophilized extract was added to the NC solution to obtain a COS:*g*-C_3N_4:*R. tinctorum* 1:0.5:0.25 weight ratio. The mixture was subjected to sonication for 1 h while maintaining the temperature below 60 °C and the pH at 4-5 [11].

For the encapsulation of *U. tomentosa* extract in COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs, 210 mg of the lyophilized extract was redissolved in methanol and added to the NC solution,

resulting in a COS:HAp:*g*-C_3N_4:*U. tomentosa* weight ratio of 2:1:0.5:1. The mixture was sonicated for 1 h in 10 min intervals while maintaining a temperature below 60 °C and a pH of 4-5 [12].

The nanocarriers, both empty and loaded with plant extracts, were characterized using transmission electron microscopy (TEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray powder diffraction (XRPD), as described in previous studies [11,12]. The encapsulation efficiency (EE) was determined using an indirect method, calculating the difference between the initial amount of extract and the non-encapsulated extract present in the supernatant after centrifugation. The release efficiency (RE) was assessed by measuring the amount of extract released after enzymatic degradation of the NCs using chitosanase.

2.4. In Vitro Antifungal Assays

The antifungal activity of both types of NCs loaded with the plant extracts —along with those of the non-encapsulated extracts and conventional fungicides, for comparison purposes— was evaluated against the selected fungal pathogens using the agar dilution method, according to EUCAST antifungal susceptibility testing standard procedures. Stock solutions of the treatments were incorporated into potato dextrose agar (PDA) medium to achieve concentrations ranging from 62.5 to 1500 µg/mL. Fungal mycelium plugs (5 mm diameter) from the margins of 1-week PDA cultures of *B. cinerea*, *R. solani*, and *S. sclerotiorum*, and 2-week PDA cultures of *C. beticola* to plates containing the specified concentrations for each treatment. Three plates per treatment/concentration combination were prepared, with two replicates each. The plates were incubated at 25 °C in the dark for one week two weeks for *C. beticola*.

The growth of the mycelium was evaluated by measuring the average of two colony diameters perpendicular to each other for each repetition. Growth inhibition was determined using the formula: Inhibition (%) = $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, where d_c and d_t represent the mean colony diameter of the untreated control and the treated fungal colony, respectively. The minimum inhibitory concentration (MIC) was defined as the lowest concentration of the tested compound resulting in complete inhibition of visible fungal growth.

2.5. Controlled Efficacy Trials

2.5.1. Ex-situ Assays on Carrot

Carrot roots (*Daucus carota* subsp. *sativus* cv. 'Nantesa') used to determine the *ex-situ* protective effect of NCs against *B. cinerea*, and *S. sclerotiorum* came from

Graneles El Montañés (Torrelavega, Cantabria, Spain) and had been previously cultivated under organic farming standards, without the use of synthetic pesticides. To begin the experiments 24 hours after harvesting, the roots were collected and sent by refrigerated urgent courier. During selection, roots were chosen for their firmness, consistent size, caliber, absence of physical damage, and absence of signs of bacterial or fungal infection.

Under controlled laboratory conditions, the efficacy of NC treatments was determined by artificial inoculation in carrot roots. The procedure was slightly modified from that proposed by Sánchez-Hernández *et al.* [13]. The roots were initially disinfected with a 3% NaOCl solution for 2 min, washed 3 times with sterile distilled water, and dried in a laminar flow hood on sterile absorbent paper.

The roots were randomly distributed into four homogeneous groups of 15 roots each (three replicates with 5 roots per replicate and treatment). Two groups were treated with the COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* NCs and the COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* NCs at MIC×2, i.e., 750 and 500 µg/mL for *B. cinerea*, and 375 µg/mL for *S. sclerotiorum*, supplemented with 0.2% Tween® 20. The other groups served as the negative control (without treatment and pathogen) and the positive control (with pathogen and without treatment). Then, 5 mm superficial wounds were made in the central zone of each root, and each treatment was sprayed and dried at room temperature in a laminar flow hood using sterile absorbent paper. A plug from a 1-week-old PDA culture of *B. cinerea* (with the mycelium oriented toward the fruit wound) was placed on the superficial wounds. The fruits were then stored in covered plastic boxes for 6 days at 25 °C and 95-98% RH, after which the lesion diameters on the root surfaces were measured.

2.5.2. In vivo Assays on Sugar Beet

In the *in vivo* experiments, sugar beet plants cv. 'Immaculata KWS' were used to evaluate the efficacy of the treatments against artificially inoculated *C. beticola* and *R. solani*, following the methods described in Sánchez-Hernández *et al.* [14] and González *et al.* [15], respectively, with small modifications. Multiple 4 × 4 cm pots were used to grow the sugar beet plants with sterile peat as substrate, with 8 plants per treatment and pathogen; two independent repetitions were carried out. The treatments (COS–*g*-C_3N_4–*R. tinctorum* and COS–HAp-*g*-C_3N_4–*U. tomentosa*) were applied at the MIC×2 concentration, i.e., at 250 and 500 µg/mL against *C. beticola* and 375 and at 1000 µg/mL against *R. solani*. In the case of *C. beticola*, it was applied by spraying (3 mL/plant). After 2 h, a conidial solution of *C. beticola* was sprayed on the youngest leaflets, previously making 3-4 punctures with a sterile entomological pin to facilitate infection. For the *R. solani* assay, the fungus was previously grown in

250 mL flasks containing PDB for 7 days at 25 °C in the dark with constant agitation. Then, the sugar beet roots were immersed in a suspension of 6×10^6 conidia/mL for 2 min, and the plants were transferred to plastic pots with sterilized substrate. Uninoculated plants sprayed with sterilized water or immersed in sterilized water were used as negative controls. All plants were incubated in a growth chamber (25 °C, 16/8 h photoperiod) for 12 days."

2.6. Field Trials

The experiments were conducted at AIMCRA's experimental fields in San Román de Hornija (coordinates 41.442918, −5.283886). Sugar beet cv. 'Immaculata KWS' was planted on March 15, 2024, at a density of 109,670 plants/ha. The experimental design consisted of randomized microplots (3×5 m) containing 150-180 plants each, with four replications per treatment.

The first fungicide application was performed on July 12, 2024, when all plots designated for NC treatments and conventional treatments received Spyrale (0.75 L/ha) + Difenoconazole 25% (0.5 L/ha) + Yukon (5.5 L/ha). This initial application of synthetic fungicides across all treatment plots was implemented to establish uniform baseline conditions and reduce pre-existing fungal pressure, thereby enabling a more accurate assessment of the subsequent experimental treatments' efficacy against new infections. Subsequent applications were made on August 2, August 13, August 29, and September 16, 2024. The NC-based treatments were applied at MIC×2 concentration (as determined in laboratory efficacy tests) using a backpack sprayer. Conventional treatment plots received different fungicide combinations at each application date: Amistar Gold (1 L/ha) + Yukon (5.5 L/ha) for the second application; Spyrale (0.75 L/ha) + Difenoconazole 25% (0.5 L/ha) + Yukon (5.5 L/ha) for the third; Tetraconazole 12.5% (0.8 L/ha) + Yukon (5.5 L/ha) for the fourth; and Spyrale (0.75 L/ha) + Difenoconazole 25% (0.5 L/ha) + Yukon (5.5 L/ha) for the fifth application. The intermediate treatment plots received a combination of synthetic and biologically-based products including: Spyrale (0.75 L/ha), Amistar Gold (1 L/ha), Tetraconazole 12.5% (0.8 L/ha), a mixture of peptides and plant-derived amino acids with macro and micronutrients, vitamins, and plant extracts combined with copper. The organic agriculture treatment plots received applications of products approved for organic farming, including: mycorrhizal fungi with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) *Bacillus amyloliquefaciens*, mycorrhizal fungi with PGPR *Bacillus subtilis*, concentrated potassium solution with manganese and zinc, saccharide derivatives with systemic ionic copper, and plant-derived fatty acids with polyalcohols containing manganese and zinc. Untreated plants served as negative controls. Plants were harvested on October 18, 2024.

Cercospora leaf spot disease severity was assessed throughout the growing period using AIMCRA's adaptation of the Kleinwanzlebener Saatzucht (KWS) scale. Scale values (*E*) were converted to the percentage of affected leaf area (ALA) using the equation: ALA = (0.0008×E^3) + (0.0021×E^2) + (0.0002×*E*) + 0.0006. The standardized area under the disease progress curve (SAUDPC) was calculated to evaluate treatment efficacy according to Waggoner [16]. The AUDPC represents the integral of disease intensity over time and was estimated using the formula: $\mathrm{AUDPC} = \sum_i^{n-1} \left(\frac{y_i+y_{i+1}}{2}\right)(t_{i+1} - t_i)$, where y_i is the percentage of visible infected area at the *i*-th observation, x_i is the day of the *i*-th observation, and *n* is the total number of observations. To normalize results and enable comparison between epidemics of different durations, the AUDPC was divided by the total number of observation days to obtain the SAUDPC [17,18].

3. Results and Discussion

3.1. Nanocarrier Characterization

The characterization of both NC systems has been previously reported in detail [11,12]. Briefly, TEM analysis of COS-*g*-C_3N_4 NCs showed spherical particles with an average diameter of 85.5 ± 21.3 nm and a dispersity index of 0.25, while COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs exhibited a slightly larger average diameter of 250 ± 84.4 nm with a dispersity index of 0.34, indicating monodispersity in both cases. The encapsulation efficiency of *R. tinctorum* extract in COS-*g*-C_3N_4 was determined to be 95–97%, while *U. tomentosa* extract showed an encapsulation efficiency of 82% in COS-HAp-*g*-C_3N_4 NCs. Release efficiency upon enzymatic degradation with chitosanase was 74–81% for *R. tinctorum* extract and 84–89% for *U. tomentosa* extract.

3.2. In Vitro Antifungal Activity

3.2.1. Minimum Inhibitory Concentrations

The minimum inhibitory concentrations (MICs) determined for the unencapsulated plant extracts and the NCs loaded with plant extracts against the tested horticultural pathogens are presented in Table 1. To compare the efficacy of encapsulated plant extracts with their free-form equivalents, equivalent MICs were calculated based on the weight ratios of components in each NC formulation (approximately 14.3% for *R. tinctorum* and 22.2% for *U. tomentosa*).

Table 1. Minimum inhibitory concentrations (MIC, µg/mL) of unencapsulated plant extracts and nanocarrier formulations against horticultural pathogens. Values in brackets indicate the equivalent concentration of encapsulated plant extract corresponding to the nanocarrier MIC.

Treatment	Pathogen			
	B. cinerea	***C. beticola***	***R. solani***	***S. sclerotiorum***
R. tinctorum extract	93.75	93.75	93.75	93.75
U. tomentosa extract	375	93.75	93.75	500
COS-g-C_3N_4-*R. tinctorum*	375 (53.6)	125 (17.9)	187.5 (26.8)	187.5 (26.8)
COS-HAp-g-C_3N_4-*U. tomentosa*	250 (55.6)	375 (83.3)	500 (111.1)	187.5 (41.7)

The results indicate that both unencapsulated extracts and NC formulations exhibited significant antifungal activity against all tested pathogens. The unencapsulated *R. tinctorum* extract showed consistent MIC values of 93.75 µg/mL across all pathogens, while the unencapsulated *U. tomentosa* extract displayed varying effectiveness, with MIC values ranging from 93.75 to 500 µg/mL depending on the pathogen.

For the NC formulations, COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* NCs showed MIC values ranging from 125 to 375 µg/mL. When calculated based on the actual *R. tinctorum* content, the equivalent extract MICs ranged from 17.9 to 53.6 µg/mL. The COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* NCs exhibited MIC values between 187.5 and 500 µg/mL. The equivalent *U. tomentosa* extract concentrations, based on its 22.2% content in the formulation, ranged from 41.7 to 111.1 µg/mL. Interestingly, when comparing the equivalent extract concentrations in NCs to unencapsulated extracts, the nanoencapsulated forms demonstrated enhanced efficacy in most cases. This improvement can be attributed to the NCs' ability to protect the bioactive compounds and potentially enhance their bioavailability. Additionally, as discussed in subsequent sections, the controlled release property of these NCs provides significant advantages in terms of sustained activity and enhanced stability under real-world conditions.

When comparing the two NC systems, COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* showed higher activity against *C. beticola* and *S. sclerotiorum*, while COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* was more effective against *B. cinerea*. These differences in activity profiles suggest that the two NC systems could be used strategically depending on the target pathogen.

3.2.2. Comparison with Commercial Fungicides

The effectiveness of the NC formulations was compared with several commercial fungicides commonly used for controlling the studied pathogens (Table 2). Commercial fungicides showed variable effectiveness against the tested pathogens, with synthetic chemical fungicides generally exhibiting higher inhibitory activity compared to copper-based products. The NC formulations demonstrated

comparable or, in some cases, superior activity to copper-based fungicides, particularly against *C. beticola*. This finding is particularly relevant considering the current trend toward reducing the use of copper-based fungicides in agriculture due to their environmental persistence and potential negative impacts on soil microbiota.

Table 2. *In vitro* antifungal activity of commercial fungicides against selected horticultural pathogens. Mycelial growth inhibition was assessed at different concentrations: recommended dose (Rd) and triple dose (Rd×3). Control measurements represent unrestricted fungal growth on potato dextrose agar (PDA) medium. The values shown are the average of three replicates.

Commercial Fungicide	Pathogen	Growth of Mycelium (mm)			Inhibition (%)	
		Control (PDA)	Rd	Rd×3	Rd	Rd×3
Amistar Gold® (Azoxystrobin 12.5% + difenoconazole 12.5%)	*B. cinerea*	75	13	0	82.7	100.0
	C. beticola	75	11	7	85.3	90.7
	R. solani	75	0	0	100.0	100.0
	S. sclerotiorum	75	9	7	88.0	90.7
Emerald® (Tetraconazole 12.5%)	*B. cinerea*	75	0	0	100.0	100.0
	C. beticola	75	25	9	66.7	88.0
	R. solani	75	21	8	72.0	89.3
	S. sclerotiorum	75	0	0	100.0	100.0
Univoq® (fenpicoxamide 5% + prothioconazole 10%)	*B. cinerea*	75	0	0	100.0	100.0
	C. beticola	75	3	0	96.0	100.0
	R. solani	75	0	0	100.0	100.0
	S. sclerotiorum	75	0	0	100.0	100.0
Clarus® (Copper 27.2%)	*B. cinerea*	75	65	60	13.3	20.0
	C. beticola	75	8	5	89.3	93.3
	R. solani	75	47	42	37.3	44.0
	S. sclerotiorum	75	75	75	0.0	0.0
Yukon® (Copper 8% + Sulfur 64%)	*B. cinerea*	75	54	30	28.0	60.0
	C. beticola	75	6	3	92.0	96.0
	R. solani	75	48	27	36.0	64.0
	S. sclerotiorum	75	75	75	0.0	0.0
Mavita® (Difenoconazole 25%)	*B. cinerea*	75	9	4	88.0	94.7
	C. beticola	75	14	11	81.3	85.3
	R. solani	75	39	18	48.0	76.0
	S. sclerotiorum	75	0	0	100.0	100.0
Spyrale® (Fenpropidin 37.5% + Difenoconazole 10%)	*B. cinerea*	75	75	0	0.0	100.0
	C. beticola	75	5	0	93.3	100.0
	R. solani	75	0	0	100.0	100.0
	S. sclerotiorum	75	0	0	100.0	100.0

* Rd stands for the recommended dose, i.e., 25 µg/mL of Amistar Gold® (azoxystrobin 12.5% + difenoconazole 12.5%), 10 µg/mL of Emerald® (tetraconazole 12.5%), 45 µg/mL of Univoq® (fenpicoxamide 5% + prothioconazole 10%), 76.16 µg/mL of Clarus® (cupric hydroxide 13.6% + copper oxychloride 13.6%), 396 µg/mL of Yukon® (tribasic copper sulfate 8% + sulfur 64%), 12.5 µg/mL of Mavita® (difenoconazole 12.5%), 35.62 µg/mL of Spyrale® (fenpropidin 37.5% + difenoconazole 10%).

3.3. Protection Assays in Controlled Conditions

The *ex-situ* experiments conducted on artificially inoculated sugar beet and carrot plants provided valuable insights into the protective effects of the NC formulations

under controlled conditions. The visual assessment of plant symptoms revealed clear differences between treated and untreated plants.

3.3.1. Carrot Protection

Carrot plants inoculated with *B. cinerea* and treated with COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* NCs at MIC×2 concentration showed complete protection against gray mold symptoms (Figure 1, left). The untreated positive control plants exhibited typical gray mold symptoms, including water-soaked lesions followed by grayish fungal growth. For carrot plants inoculated with *S. sclerotiorum*, both NC formulations at MIC×2 concentration provided significant protection against white mold symptoms. The untreated positive control plants displayed characteristic symptoms, including white, fluffy mycelial growth and the formation of black sclerotia.

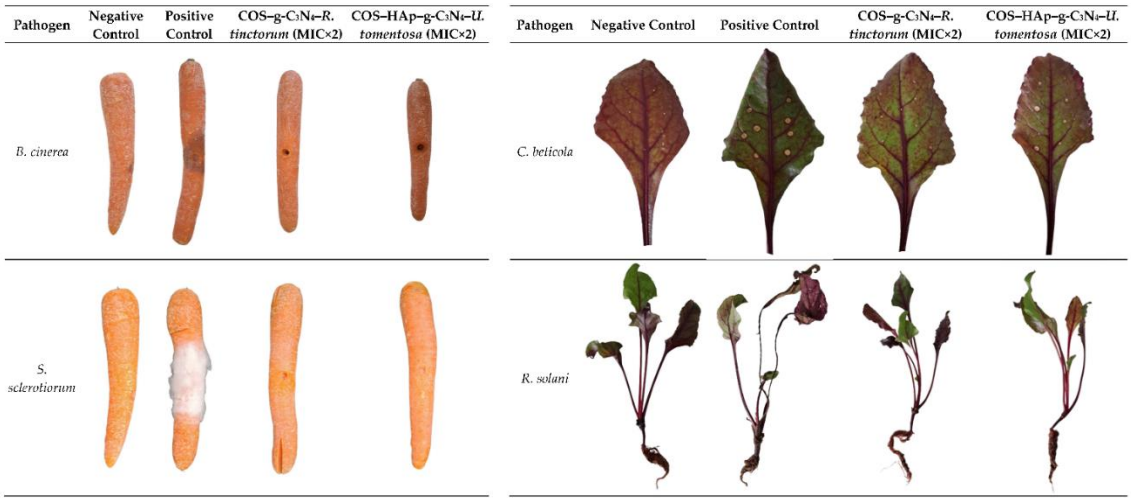


Figure 1. Results of NC protection efficacy *ex-situ* trials against *B. cinerea* and *S. sclerotiorum* on carrot roots (*left*), and results of NC protection efficacy *in vivo* experiments against *C. beticola* and *R. solani* on sugar beet plants (*right*).

3.3.2. Sugar Beet Protection

Sugar beet plants inoculated with *C. beticola* and treated with COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* NCs at MIC×2 concentration showed complete protection, with no visible symptoms of Cercospora leaf spot (Figure 1, right). In contrast, untreated control plants exhibited typical symptoms, including necrotic lesions with reddish-brown borders and gray centers. Similarly, sugar beet plants inoculated with *R. solani* and treated with either NC formulation at MIC×2 concentration showed significant protection against crown and root rot symptoms. The untreated positive control plants displayed characteristic symptoms, including crown rot, wilting, and eventual death.

These results from the experiments in controlled conditions confirmed the protective effects of the NC formulations observed in the *in vitro* assays and demonstrated their potential for real-world applications in horticultural crop protection.

3.4. Field Trials

Field trial results are summarized in Table 3, which includes Cercospora leaf spot disease severity assessed according to the KWS scale, percentages of affected leaf area, AUDPC and SAUDPC values, and treatment effectiveness.

The progression of disease severity over time, as reflected by the KWS scale values and affected leaf area percentages, demonstrated that all treatments slowed disease development compared to the untreated control. However, the conventional treatment maintained the lowest disease severity throughout the evaluation period. The NC treatments showed intermediate performance, consistently outperforming both the organic agriculture treatment and the intermediate treatment. By the final assessment (October 18), the difference in disease severity between the conventional treatment and the NC treatments was relatively modest (10.13 vs. 10.28/10.25 on the KWS scale, and 105.59% vs. 109.24%/108.51% affected leaf area), suggesting that the performance gap diminishes as the season progresses.

The SAUDPC values, which provide an integrated measure of disease progress over time, clearly differentiated the performance of the various treatments, with values of 27.54, 31.21, 31.99, 35.80, 46.92, and 53.10 for the conventional treatment, COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* NC, COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* NC, intermediate treatment, organic agriculture treatment, and untreated control, respectively.

In terms of treatment effectiveness, the two nanocarrier-based treatments showed comparable effectiveness values (41% for COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* and 40% for COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa*), which were lower than those of the conventional treatment (48%). Nonetheless, the NC formulations performed substantially better than the organic agriculture treatment (12% effectiveness) and the intermediate treatment approach (33% effectiveness).

The relatively small gap in disease severity between conventional treatments and NC-based treatments by the end of the growing season suggests that these sustainable alternatives can provide satisfactory disease control, particularly in integrated pest management systems or in contexts where reducing synthetic chemical inputs is a priority.

Table 3**. Cercospora leaf spot disease severity according to the KWS scale and affected leaf area (%), area under disease progress curve (AUDPC), standardized area under disease progress curve (SAUDPC), and treatment effectiveness (%) for different treatment strategies in sugar beet field trials at San Román de Hornija, Spain (2024 growing season).**

Treatment	KWS scale				Affected leaf area (%)				∑AUDPC	SAUDPC	Effectiveness (%)
	29/08/24	13/09/24	14/10/24	18/10/24	29/08/24	13/09/24	14/10/24	18/10/24			
Untreated control	6.30	9.68	11.00	11.50	28.57	92.66	135.02	152.70	5416.13	53.10	0%
Conventional treatment	3.75	6.80	9.63	10.13	7.59	35.46	91.76	105.59	2808.96	27.54	48%
Intermediate treatment	4.98	8.23	9.88	10.38	15.92	59.22	97.89	112.34	3651.25	35.80	33%
Organic agriculture treatment	6.15	9.30	10.50	11.00	26.82	83.21	118.14	134.37	4786.07	46.92	12%
COS-g-C_3N_4-*R. tinctorum*	4.18	7.65	9.78	10.28	9.64	48.34	95.06	109.24	3183.51	31.21	41%
COS-HAp-g-C_3N_4-*U. tomentosa*	4.30	7.85	9.75	10.25	10.40	51.86	94.40	108.51	3263.12	31.99	40%

3.5. Mode of Action and Advantages of Nanocarrier Systems

The enhanced efficacy of plant extracts when delivered through NC systems can be attributed to several factors. First, the NCs protect the bioactive compounds from degradation due to environmental factors such as UV radiation, heat, and oxidation, thereby extending their effective lifespan. Second, they improve the water solubility and bioavailability of the typically hydrophobic plant secondary metabolites, enhancing their interaction with the target pathogens. Third, they provide a controlled release mechanism that maintains effective concentrations of the bioactive compounds over extended periods, reducing the need for frequent applications [19-22].

In the case of chitosan-based NCs, the chitosan component itself contributes to the overall antimicrobial activity through various mechanisms, including disruption of fungal cell membranes, chelation of essential nutrients, and inhibition of fungal spore germination [23]. This synergistic action between the carrier material and the carried bioactive compounds likely contributes to the observed efficacy of the NC formulations.

The bioactive compounds present in *R. tinctorum* and *U. tomentosa* extracts have been previously characterized [7,8]. *R. tinctorum* contains anthraquinones and phenols, which have demonstrated antifungal activity through mechanisms including disruption of cell membrane integrity and inhibition of enzymatic processes [7]. *U. tomentosa* contains alkaloids, quinovic acid glycosides, and polyphenols that exhibit antimicrobial activity through multiple mechanisms, including inhibition of cell wall synthesis and disruption of membrane function [8].

The combination of these bioactive compounds with the multifunctional NC systems developed in this study results in a comprehensive crop protection approach that

addresses multiple aspects of pathogen control while minimizing environmental impact. The controlled release properties of the NC ensure that effective concentrations of the bioactive compounds are maintained at the target site, even under challenging environmental conditions.

4. Conclusions

This study demonstrated the potential of chitosan-based NCs loaded with natural plant extracts for the sustainable management of important horticultural pathogens. Both COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* and COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* NC formulations exhibited significant antifungal activity against *B. cinerea*, *C. beticola*, *R. solani*, and *S. sclerotiorum in vitro*, with MIC values ranging from 125 to 500 $\mu g \cdot mL^{-1}$.

The *ex-situ* and *in vivo* experiments on artificially inoculated carrots and sugar beet plants confirmed the protective effects of these NC formulations under controlled conditions, demonstrating their potential for real-world applications. Complete plant protection was achieved at concentrations corresponding to MIC×2 for the respective pathogens.

Field trials conducted in sugar beet cultivation under real agricultural conditions validated the efficacy of the NC formulations against Cercospora leaf spot disease. While conventional synthetic fungicides provided the highest level of disease control (48% effectiveness), both NC formulations demonstrated substantial effectiveness (40-41%), significantly outperforming organic agriculture alternatives (12%) and intermediate treatment approaches (33%). The relatively small gap in disease severity between conventional treatments and NC-based treatments by the end of the growing season suggests that these sustainable alternatives can provide satisfactory disease control, particularly in integrated pest management systems or in contexts where reducing synthetic chemical inputs is a priority.

The NC approach offers several advantages over conventional application methods for plant extracts, including protection of bioactive compounds from degradation, improved bioavailability, and controlled release properties. These features, combined with the intrinsic antimicrobial properties of chitosan, contribute to the enhanced efficacy observed in this study.

The development of effective alternatives to synthetic fungicides is crucial for sustainable agriculture, particularly in the context of increasing regulatory restrictions and growing consumer demand for environmentally friendly agricultural practices. The NC-delivered plant extracts described in this study represent a promising approach to addressing these challenges, offering effective crop protection while minimizing environmental impact.

Author Contributions: Conceptualization, E.S.-H. and P.M.-R.; methodology, E.S.-H., M.G.-S., and V.G.-G.; software, J.L.M.-R.; validation, E.S.-H., M.G.-S., and V.G.-G.; formal analysis, R.C.-C., E.S.-H. and P.M.-R.; investigation, R.C.-C., E.S.-H., A.S.-A., M.G.-S., J.M.-G., J.L.M.-R., V.G.-G., L.M.N.-G., and P.M.-R.; resources, M.G.-G. and J.M.-G.; data curation, M.G.-S.; writing—original draft preparation, R.C.-C., E.S.-H., and P.M.-R.; writing—review and editing, R.C.-C., E.S.-H., and P.M.-R.; visualization, E.S.-H., L.M.N.-G., and J.L.M.-R.; supervision, E.S.-H. and P.M.-R.; project administration, E.S.-H., J.M.-G., and P.M.-R.; funding acquisition, E.S.-H., J.M.-G., and P.M.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Junta de Castilla y León under project VA148P23, with FEDER co-funding. Financial support was also received from the University of Valladolid Foundation through the AGRODRON project (NT51).

Acknowledgments: The authors would like to thank AIMCRA (Association for the Improvement of Sugar Beet Cultivation) for providing the facilities for the field trials and technical support during the experiments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Weiland, J.; Koch, G. Sugarbeet leaf spot disease (*Cercospora beticola* Sacc.). *Mol. Plant Pathol.* **2004**, *5*, 157-166, doi:10.1111/j.1364-3703.2004.00218.x.
2. Harveson, R.M.; Hanson, L.E.; Hein, G.L. *Compendium of beet diseases and pests*, 2nd ed.; American Phytopathological Society: St. Paul, Minn., 2009; pp. 140.
3. Bolton, M.D.; Thomma, B.P.H.J.; Nelson, B.D. *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary: biology and molecular traits of a cosmopolitan pathogen. *Mol. Plant Pathol.* **2005**, *7*, 1-16, doi:10.1111/j.1364-3703.2005.00316.x.
4. Agrios, G.N. *Plant pathology*, 5th ed.; Elsevier Academic Press: Amsterdam; Boston, 2005; pp. 922.
5. Lamichhane, J.R.; Dachbrodt-Saaydeh, S.; Kudsk, P.; Messéan, A. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. *Plant Dis.* **2016**, *100*, 10-24, doi:10.1094/pdis-05-15-0574-fe.
6. Wink, M. Modes of action of herbal medicines and plant secondary metabolites. *Medicines* **2015**, *2*, 251-286, doi:10.3390/medicines2030251.
7. Langa-Lomba, N.; Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Activity of anthracenediones and flavoring phenols in hydromethanolic extracts of *Rubia tinctorum* against grapevine phytopathogenic fungi. *Plants* **2021**, *10*, 1527, doi:10.3390/plants10081527.
8. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J.; Santiago-Aliste, A.; Hernández-Navarro, S.; Oliveira, R.; González-García, V. Bark extract of *Uncaria tomentosa* L. for the control of strawberry phytopathogens. *Horticulturae* **2022**, *8*, 672, doi:10.3390/horticulturae8080672.
9. Stan, D.; Enciu, A.M.; Mateescu, A.L.; Ion, A.C.; Brezeanu, A.C.; Stan, D.; Tanase, C. Natural compounds with antimicrobial and antiviral effect and nanocarriers used for their transportation. *Front Pharmacol* **2021**, *12*, 723233, doi:10.3389/fphar.2021.723233.
10. Maluin, F.N.; Hussein, M.Z. Chitosan-based agronanochemicals as a sustainable alternative in crop protection. *Molecules* **2020**, *25*, 1611, doi:10.3390/molecules25071611.
11. Santiago-Aliste, A.; Sánchez-Hernández, E.; Langa-Lomba, N.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Multifunctional nanocarriers based on chitosan oligomers and graphitic carbon nitride assembly. *Materials* **2022**, *15*, 8981, doi:10.3390/ma15248981.
12. Santiago-Aliste, A.; Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; Marcos-Robles, J.L.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. *Uncaria tomentosa*-loaded chitosan oligomers–hydroxyapatite–carbon nitride nanocarriers for postharvest fruit protection. *Agronomy* **2023**, *13*, 2189, doi:10.3390/agronomy13092189.

13. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Navas Gracia, L.M.; Martín-Gil, J.; Garcés-Claver, A.; Flores-León, A.; González-García, V. *Armeria maritima* (Mill.) Willd. flower hydromethanolic extract for Cucurbitaceae fungal diseases control. *Molecules* **2023**, *28*, 3730, doi:10.3390/molecules28093730.
14. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Palacio-Bielsa, A.; Lorenzo-Vidal, B.; Buzón-Durán, L.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Antibacterial activity of *Ginkgo biloba* extracts against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *Pseudomonas* spp., and *Xanthomonas vesicatoria*. *Horticulturae* **2023**, *9*, 461, doi:10.3390/horticulturae9040461.
15. González, V.; Aguado, A.; Garcés-Claver, A. First report of *Fusarium oxysporum* causing wilt and root rot in common borage (*Borago officinalis*) in Spain. *Plant Dis.* **2019**, *103*, 1774–1774, doi:10.1094/pdis-02-19-0259-pdn.
16. Waggoner, P. Progress curves of foliar diseases: their interpretation and use. In *Plant disease epidemiology. Population dynamics and management*, Leonard, K., Fry, W., Eds. Macmillan Publishing Company: New York, NY, USA, 1986; pp. 3-37.
17. Shaner, G.; Finney, R.E. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat. *Phytopathology* **1977**, *67*, 1051-1056.
18. Fry, W. Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of potato late blight. *Phytopathology* **1978**, *68*, 1650-1655.
19. Pinto, T.V.; Silva, C.A.; Siquenique, S.; Learmonth, D.A. Micro- and nanocarriers for encapsulation of biological plant protection agents: A systematic literature review. *ACS Agricultural Science & Technology* **2022**, *2*, 838–857, doi:10.1021/acsagscitech.2c00113.
20. Pan, X.; Guo, X.; Zhai, T.; Zhang, D.; Rao, W.; Cao, F.; Guan, X. Nanobiopesticides in sustainable agriculture: developments, challenges, and perspectives. *Environmental Science: Nano* **2023**, *10*, 41-61, doi:10.1039/d2en00605g.
21. Yin, J.; Su, X.; Yan, S.; Shen, J. Multifunctional nanoparticles and nanopesticides in agricultural application. *Nanomaterials* **2023**, *13*, 1255, doi:10.3390/nano13071255.
22. Tao, R.; You, C.; Qu, Q.; Zhang, X.; Deng, Y.; Ma, W.; Huang, C. Recent advances in the design of controlled- and sustained-release micro/nanocarriers of pesticide. *Environmental Science: Nano* **2023**, *10*, 351–371, doi:10.1039/d2en00446a.
23. Ma, Z.; Garrido-Maestu, A.; Jeong, K.C. Application, mode of action, and *in vivo* activity of chitosan and its micro- and nanoparticles as antimicrobial agents: A review. *Carbohydr. Polym.* **2017**, *176*, 257–265, doi:10.1016/j.carbpol.2017.08.082.

Chitosan-based Nanocarriers Loaded with Natural Plant Extracts: A Promising Strategy for Controlling Fusarium Wilt of Banana Caused by Foc TR4 and STR4

Eva Sánchez-Hernández [1,*], Carmen Gómez-Lama Cabanás [2], Antonio Valverde-Corredor [2], Carlos Casanova-Muñoz [2], Alberto Santiago-Aliste [3], Jesús Martín-Gil [1], Pablo Martín-Ramos [1]

1 Department of Agricultural and Forestry Engineering, ETSIIAA, University of Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, Spain

2 Sustainable Agriculture Institute (IAS-CSIC), Avda. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba, Spain

3 Department of Construction and Agronomy, Escuela Politécnica Superior de Zamora, University of Salamanca, Av. de Requejo 33, 49029 Zamora, Spain

* Correspondence: eva.sanchez.hernandez@uva.es

Abstract: Fusarium wilt of banana (FWB) caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (Foc TR4) poses a severe threat to global banana production, with potentially devastating impacts on economies heavily dependent on banana cultivation, such as the Canary Islands. The absence of commercial banana varieties that combine TR4 resistance with desired agronomic traits makes the development of control strategies crucial. As conventional control methods have shown limited efficacy and climate change may exacerbate disease pressure, alternative approaches are urgently needed. This study investigates the application of innovative nanocarriers (NCs) based on chitosan oligomers for the controlled delivery of bioactive compounds from natural sources. Two types of NCs were developed, incorporating aqueous ammonia extract from either *Rubia tinctorum* roots or *Uncaria tomentosa* bark. Laboratory assays demonstrated that both NC formulations exhibited significant antifungal activity against Foc TR4, with effective concentration values (EC_{50}) of 620.5 and 610.3 $\mu g \cdot mL^{-1}$ against subtropical race 4 (STR4) and of 328.2 and 291.7 $\mu g \cdot mL^{-1}$ against Foc TR4. This research contributes to the ongoing efforts to develop sustainable solutions for protecting banana crops against this devastating disease, which currently affects an estimated 100,000 hectares globally with losses of around US $2 billion.

Keywords: chitosan oligomers, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, *Musa* spp., nanocarriers, natural extracts, sustainable banana production.

1. Introduction

Banana (*Musa* spp.) is one of the most important fruit and cash crops in terms of production volume and trade worldwide. The crop is grown in more than 120 countries across the tropics and subtropics, where around 400 million people

depend on it for food security and income. The global production of bananas is projected to grow at 1.5% per annum, reaching 135 million tonnes by 2028 according to the OECD-FAO Agricultural Outlook report [1].

In the Canary Islands, the banana ('plátano de Canarias') stands out as the predominant intensive crop, encompassing over 20% of the total agricultural area. The Canarian banana sector comprises over 8,000 producers, constituting nearly 40% of the agricultural workforce, and yields more than 400,000 tons of bananas annually [2]. The banana cultivation system in the Canary Islands is highly advanced, employing techniques such as artificial soil preparation, the utilization of *in vitro* propagated plants from meticulously selected cultivars, contemporary fertigation techniques, and the widespread adoption of cultivation systems with wind protection.

The origin and sensory attributes of Canarian banana production are safeguarded by a Protected Geographical Indication (PGI) trademark. Furthermore, bananas constitute the crop with the largest certified area adhering to Good Agricultural Practices (IPM, Global Gap) standards. Over the preceding decade, the Canarian banana industry has achieved notable success in diminishing the use of chemicals through the implementation of a Self-Control Plan for Pesticide Residues, in effect since 2010 [3].

1.1. Fusarium Wilt of Banana

Banana production in major growing regions is greatly affected by diverse biotic and abiotic stresses, ultimately threatening the livelihoods of smallholder farmers in the developing world. Prominent biotic stresses include pests such as banana weevils and nematodes, while diseases include banana bacterial wilt, black leaf streak disease, banana bunchy top virus disease, and Fusarium wilt (FW) [4].

Fusarium wilt of banana (FWB) is considered one of the most destructive diseases affecting this crop, with an estimated affected area of 100,000 ha and around US $2 billion in losses [5]. The causal agent is the soil-borne fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) which infects banana roots, progresses into the xylem of the rhizome, induces wilt, and may eventually kill susceptible cultivars [6].

There are four recognized races of Foc, which are traditionally identified based on their reaction to different host cultivars. Race 1 (R1) targets Gros Michel, Silk, Lady Finger, Maqueno, Pome, and Pisang Awak banana cultivars, leading to the decline of Gros Michel's dominance in the 1950s. Race 2 (R2) affects cooking bananas like Monthan and Bluggoe, along with related varieties. Race 3 is non-pathogenic in

bananas, exclusively attacking *Heliconia* spp. Race 4 (R4) impacts Cavendish (AAA) and cultivars susceptible to R1 and R2 [4].

Race 4 is usually split into subtropical (STR4) and tropical (TR4) races. Whereas STR4 needs predisposing factors to cause FWB (e.g., plants subjected to cold temperatures and other abiotic stresses), TR4 can trigger the disease in Cavendish bananas grown under a broad range of conditions, and it is currently considered the most virulent form of the pathogen [7]. TR4 clone emerged in the 1990s. It was first identified in Taiwan and rapidly spread to Southeast Asia, China, Australia, India, Pakistan, the Middle East, and Africa. Nowadays, TR4 has been detected in numerous banana-producing regions, including American countries such as Venezuela, and its alarming spread has raised significant concern among producers and in the banana industry [8].

In 2023, Foc TR4 was added to the EPPO Alert List of fungal diseases due to its presence in Jordan, Israel, and Turkey. Once this pathogen invades a new area, it is virtually impossible to eradicate or control it by means of fungicides or agricultural practices [9].

The control of FWB is especially challenging for several reasons. First, Foc is a soil-borne pathogen that, even in the absence of host plants, is able to largely persist in the soil or within asymptomatic alternate hosts. Second, it is a vascular pathogen that becomes inaccessible to many control measures (e.g., non-endophytic biological control agents, non-systemic fungicides, etc.) once established within the xylem. Third, it easily spreads through banana vegetative propagation material, soil, workers, machinery, irrigation water, and other vectors.

Moreover, the Cavendish banana monoculture expansion through uncertificated plants favors the dispersion of the disease, which is a particularly concerning scenario when TR4 is present. Despite breeding efforts targeting FWB resistance, there are still no commercial banana varieties available that combine high resistance to TR4 with desirable agronomic traits [10].

1.2. Current Control Measures and Limitations

Currently, FWB incidence in the Canary Islands ranges from 2 to 12%, although occasional disease incidences affecting up to 30% of the plants have been reported in some areas. Fortunately, TR4 has not yet been detected in the archipelago, but STR4 attacks have been reported [9]. However, there is a strong concern among Canaria banana growers and authorities due to the potential arrival of this highly virulent race. Additionally, the banana industry in the Canary Islands is predominantly based on the cultivar Dwarf Cavendish AAA (‘Pequeña Enana’) which

is susceptible to TR4. Climate change can also favor TR4, which is adapted to higher temperatures than STR4 [11].

Farmers in the Canary Islands combat FWB by implementing several curative practices against STR4. These strategies range from soil amendments with calcium hydroxide or ammonia fumigation to increase soil pH, to antifungal treatment employing zinc sulfate or silicon; as well as avoidance of waterlogging and soil acidification. Moreover, an increase of soil organic matter content to >3%, avoidance of mulching to favor soil aeration, or application of plant defense elicitors are regularly advised to banana growers to restrict the incidence of FWB in the archipelago [3].

Regarding TR4, despite the rigorous exclusion measures (quarantine, certification of material) to prevent its introduction, the Canarian banana industry needs to be prepared for its potential arrival. Once TR4 is present, the focus of protective measures must shift towards efficient containment, including the implementation of targeted and innovative strategies based on sustainable approaches.

1.3. Plant-derived Natural Products for Crop Protection

Given the risks associated with synthetic fungicides and the increasing restrictions on their use due to environmental concerns, bioactive natural products (BNPs) from plant sources have emerged as promising alternatives for crop protection [12]. Plant extracts contain a diverse array of phytochemicals with antimicrobial properties, including phenolic compounds, flavonoids, alkaloids, terpenoids, and essential oils, which can inhibit phytopathogen growth through various mechanisms.

Two plant sources that have shown particular promise in controlling fungal pathogens are *Rubia tinctorum* L. (Dyer's madder) and *Uncaria tomentosa* (Willd. ex Schult.) DC. (cat's claw). *Rubia tinctorum* roots are rich in anthraquinones such as alizarin and purpurin, which have demonstrated significant antifungal activity against various phytopathogens [13]. Similarly, *U. tomentosa* bark contains bioactive compounds including alkaloids, quinovic acid glycosides, and polyphenols that have shown effective antimicrobial properties [14].

However, the direct application of plant extracts faces several challenges, including rapid degradation of active compounds, limited bioavailability, and poor water solubility. These limitations can significantly reduce their effectiveness in field conditions, particularly against soil-borne and vascular pathogens like Foc.

1.4. Nanotechnology for Enhanced Delivery of Bioactive Compounds

Nanotechnology offers promising applications in agriculture, aiming to increase crop production while reducing environmental impact. Nanocarriers (NCs) enable the efficient transport of biologically active molecules, minimizing the required amount of bioactive compounds and allowing for controlled release over time [15].

Chitosan-based nanocarriers have garnered significant attention in agricultural applications due to chitosan's film-forming ability, biodegradability, biocompatibility, and intrinsic antimicrobial properties. When used as a delivery system, chitosan NCs can protect encapsulated bioactive compounds from degradation, enhance their penetration into plant tissues, and provide sustained release of the active ingredients [16].

Advanced nanocarrier systems incorporating carbon nitride (*g*-C_3N_4) have shown particular promise due to their unique properties, including low toxicity, excellent biocompatibility, high tissue penetration, and efficient encapsulation capabilities owing to their large surface area [17]. Similarly, hydroxyapatite (HAp) has been successfully used as a delivery agent for various bioactive compounds due to its biodegradability, biocompatibility, and high surface-area-to-volume ratio [18].

The combination of these materials into more complex systems—such as chitosan oligomers (COS)-*g*-C_3N_4 and COS-HAp-*g*-C_3N_4 assemblies—creates multifunctional nanocarriers with enhanced capabilities for the targeted delivery of bioactive compounds [19,20].

1.5. Objectives of the Study

Given the critical threat posed by Foc TR4 to global banana production and the limitations of conventional control methods, this study aims to evaluate the antifungal efficacy of two types of chitosan-based nanocarriers loaded with natural plant extracts (*R. tinctorum* and *U. tomentosa*) against Foc STR4 and TR4 *in vitro*, and determine the effective concentrations required to inhibit mycelial growth of both pathogen races.

2. Materials and Methods

2.1. Reagents and Fungal Isolates

High molecular weight chitosan (CAS No. 9012-76-4; MW: 310,000–375,000 Da) was supplied by Hangzhou Simit Chem. & Tech. Co. (Hangzhou, China). Melamine cyanurate (CAS No. 37640-57-6; >99.0%) was purchased from Nachmann S.r.l. (Milano, Italy). Neutrase™ 0.8 L enzyme was supplied by Novozymes A/S (Bagsværd,

Denmark). All other reagents, including chitosanase from *Streptomyces griseus* (EC 3.2.1.132), acetic acid (80% in H_2O), methacrylic anhydride (≥94%), calcium hydroxide (99.995%), phosphoric acid (≥85%), methanol, tetrahydrofuran (THF), and Tween® 20, were obtained from Sigma-Aldrich Química (Madrid, Spain).

The fungal isolates used in this study were *F. oxysporum* f. sp. *cubense* subtropical race 4 (STR4, indigenous Canarian strain 3GI-I, VCG 0120 isolated from banana stem) and *F. oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (TR4, isolate 54006II5, VCG 01213/16, supplied by Prof. Antonio Di Pietro, University of Córdoba, Spain).

2.2. Plant Material and Preparation of Extracts

Rubia tinctorum specimens used for the preparation of the bioactive extract were collected from the banks of the Carrión River as it passes through the town of Palencia (Spain). The preparation and characterization of the hydromethanolic extract were performed following the methodology described by Langa-Lomba *et al.* [13]. Briefly, dried and ground *R. tinctorum* roots were extracted with a methanol:water (1:1, *v/v*) mixture using ultrasonication for 30 minutes at 40 °C, followed by filtration and concentration under reduced pressure. The extract was then freeze-dried to obtain a powdered product.

Uncaria tomentosa bark specimens were collected in La Merced (Chanchamayo, Peru). The aqueous ammonia extract was prepared according to the method described by Sánchez-Hernández *et al.* [14]. In summary, dried and ground bark was extracted with a 5% (*v/v*) aqueous ammonia solution at a 1:10 (*w/v*) ratio under continuous stirring for 24 hours at room temperature. The extract was filtered, concentrated, and freeze-dried to obtain a powdered extract.

The phytochemical profiles of both plant extracts have been previously characterized and reported in the aforementioned studies [14,15].

2.3. Synthesis and Characterization of Nanocarriers

2.3.1. Preparation of Chitosan Oligomers and g-C_3N_4

Chitosan oligomers were prepared according to the procedure described by Santiago-Aliste et al. [19]. High molecular weight chitosan was dissolved in citric acid under constant stirring at 60 °C. Neutrase™ enzyme was then used to degrade the chitosan polymer chains, obtaining oligomers with a molecular weight of <2 kDa and a polydispersity index of 1.6.

High-purity nanosheets of *g*-C_3N_4 were obtained from the pyrolysis of melamine cyanurate in a capped crucible under an air atmosphere at 600 °C for 50 min, following the previously reported procedure [21].

Hydroxyapatite (HAp) was prepared by a wet chemical precipitation method, using a solution of H_3PO_4 with $Ca(OH)_2$ according to the procedure described in Santiago-Aliste et al. [20], with slight modifications in the ultrasonication conditions.

2.3.2. Synthesis of COS-g-C_3N_4 Nanocarriers

The preparation of COS-*g*-C_3N_4 nanocarriers was performed as described in Santiago-Aliste et al. [19] and in Spanish patent ES2958909 (international patent WO 2024/018098 A1). Briefly, methacrylated chitosan was synthesized by adding 420 mg of oligomers to a solution of methacrylic anhydride (MA) in tetrahydrofuran (THF) (0.5 mL in 25 mL), followed by ultrasonication. The co-encapsulating chemical species (*g*-C_3N_4) was prepared by dispersing 210 mg of *g*-C_3N_4 in a solution of MA in THF (0.5 mL in 25 mL). The methacrylated *g*-C_3N_4 solution was then added dropwise to the methacrylated COS solution, followed by ultrasonication to obtain a COS:*g*-C_3N_4: weight ratio of 1:0.5. The excess MA was removed by agitation and successive washings.

2.3.3. Synthesis of COS-HAp-g-C_3N_4 Nanocarriers

The COS-HAp-*g*-C_3N_4 nanocarriers were prepared following the procedure described in Santiago-Aliste et al. [20] and in Spanish patent application P202330435 (WO 2024/246386 A1). The three constituents were initially modified with methacrylic anhydride (MA). For methacrylated COS, 420 mg of oligomers were added to a solution of 0.5 mL MA in 25 mL of THF, followed by ultrasonication. Methacrylated HAp was prepared by dispersing 210 mg of HAp in a solution of MA in THF (0.25 mL in 12.5 mL) and subjecting it to ultrasonication. Similarly, 105 g of *g*-C_3N_4 was methacrylated using the same approach.

The methacrylated HAp solution was then gradually added to the methacrylated COS solution, followed by ultrasonication and stirring. Subsequently, the methacrylated *g*-C_3N_4 solution was also added to this mixture, followed by further ultrasonication and stirring. The resulting solution was stirred for 24 h, centrifuged, repeatedly washed with milli-Q water, and freeze-dried, resulting in a COS:HAp:*g*-C_3N_4 weight ratio of 2:1:0.5.

2.3.4. Encapsulation of Plant Extracts in Nanocarriers

For the encapsulation of *R. tinctorum* extract in COS-*g*-C_3N_4 nanocarriers, 105 mg of the lyophilized extract was added to the nanocarrier solution to obtain a COS:*g*-

C_3N_4:*R. tinctorum* 1:0.5:0.25 weight ratio. The mixture was subjected to sonication for 1 h while maintaining the temperature below 60 °C and the pH at 4-5 [19].

For the encapsulation of *U. tomentosa* extract in COS-HAp-*g*-C_3N_4 nanocarriers, 210 mg of the lyophilized extract was redissolved in methanol and added to the nanocarrier solution, resulting in a COS:HAp:*g*-C_3N_4:*U. tomentosa* weight ratio of 2:1:0.5:1. The mixture was sonicated for 1 h in 10 min intervals while maintaining a temperature below 60 °C and a pH of 4-5 [20].

2.3.5. Characterization of Nanocarriers

The nanocarriers, both empty and loaded with plant extracts, were characterized using transmission electron microscopy (TEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray powder diffraction (XRPD), as described in previous studies [19,20].

The encapsulation efficiency (EE) and release efficiency (RE) of the plant extracts were determined using the methodology described in the aforementioned studies. Briefly, the EE was determined using an indirect method, calculating the difference between the initial amount of extract and the non-encapsulated extract present in the supernatant after centrifugation. The RE was assessed by measuring the amount of extract released after enzymatic degradation of the nanocarriers using chitosanase.

2.4. In Vitro Antifungal Assays

The antifungal activity of both types of nanocarriers loaded with plant extracts was evaluated against Foc STR4 and TR4 following the methodology described in Santiago Aliste *et al.* [20], with slight modifications. The agar dilution method was used according to EUCAST antifungal susceptibility testing standard procedures.

Stock solutions of the nanocarriers loaded with plant extracts were incorporated into potato dextrose agar (PDA) medium to achieve concentrations ranging from 62.5 to 1500 $\mu g \cdot mL^{-1}$. Fungal mycelium plugs (5 mm diameter) from the margins of 1-week-old PDA cultures of Foc STR4 and TR4 were transferred to plates containing the specified concentrations for each treatment. Three plates per treatment/concentration combination were prepared, with two replicates each. The plates were incubated at 25 °C in the dark for 1 week.

The growth of the mycelium was evaluated by measuring the average of two colony diameters perpendicular to each other for each repetition. Growth inhibition was determined using the formula: Inhibition (%) = $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, where d_c and d_t

represent the mean colony diameter of the untreated control and the treated fungal colony, respectively.

Effective concentrations (EC_{50} and EC_{90}) were estimated by fitting a four-parameter logistic equation (dose-response curve) using IBM SPSS Statistics v.25 (IBM; Armonk, NY, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Nanocarrier Characterization

The characterization of both nanocarrier systems has been previously reported in detail [19,20]. Briefly, TEM analysis of COS-*g*-C_3N_4 nanocarriers showed spherical particles with an average diameter of 85.5 ± 21.3 nm and a dispersity index of 0.25, while COS-HAp-*g*-C_3N_4 nanocarriers exhibited a slightly larger average diameter of 250 ± 84.4 nm with a dispersity index of 0.34, indicating monodispersity in both cases.

FTIR spectroscopy confirmed the successful cross-linking of the components in both nanocarrier systems, showing characteristic absorption bands for COS (1564, 1389, and 1018 cm^{-1}), *g*-C_3N_4 (3346-3327, 1237, 1206, and 811 cm^{-1}), and HAp (560, 595-599, and 952 cm^{-1}) in the respective formulations.

The encapsulation efficiency of *R. tinctorum* extract in COS-*g*-C_3N_4 was 95-97%, while *U. tomentosa* extract showed an encapsulation efficiency of 82% in COS-HAp-*g*-C_3N_4 nanocarriers. Release efficiency upon enzymatic degradation with chitosanase was 74-81% for *R. tinctorum* extract and 84-89% for *U. tomentosa* extract.

3.2. In Vitro Antifungal Activity

The *in vitro* antifungal activity of both nanocarrier formulations against Foc STR4 and TR4 is summarized in Table 1, which presents the effective concentrations (EC_{50} and EC_{90}) for inhibition of mycelial growth. To ascertain the content of the encapsulated plant extracts, equivalent MICs were calculated based on the weight proportions of the active components in each NC formulation. The values in parentheses represent the effective concentrations of the plant extracts alone (14.3% for *R. tinctorum* in COS-*g*-C_3N_4, and 22.2% for *U. tomentosa* in COS-HAp-*g*-C_3N_4), which were calculated from the total nanocarrier concentrations.

Table 1. Effective concentrations (EC_{50} and EC_{90}) in $\mu g \cdot mL^{-1}$ of nanocarrier treatments against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* STR4 and TR4. Values in brackets indicate the equivalent concentration of encapsulated plant extract corresponding to the nanocarrier MIC.

Nanocarrier Treatment	Effective Concentrations ($\mu g \cdot mL^{-1}$)	*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* STR4	TR4
COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum*	EC_{50}	620.5 (88.7)	328.2 (46.9)
	EC_{90}	953.8 (136.4)	960.4 (137.3)
COS-HAp-*g*-C_3N_4–*U. tomentosa*	EC_{50}	610.3 (135.5)	291.7 (64.8)
	EC_{90}	956.3 (212.3)	938.2 (208.3)

STR4 = Subtropical Race 4 (quarantine); TR4 = Tropical Race 4 (TR4).

Both nanocarrier formulations exhibited significant antifungal activity against both Foc races. Interestingly, both formulations showed higher efficacy against TR4 compared to STR4, with EC_{50} values approximately half of those required for STR4. This observation is particularly relevant given that TR4 is considered the more virulent and destructive race.

The COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* nanocarriers showed slightly higher efficacy against TR4 (EC_{50} = 291.7 $\mu g \cdot mL^{-1}$) compared to COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* (EC_{50} = 328.2 $\mu g \cdot mL^{-1}$), although both formulations required similar concentrations to achieve 90% inhibition (EC_{90} values of 938.2 and 960.4 $\mu g \cdot mL^{-1}$, respectively).

The dose-response relationship showed a clear concentration-dependent inhibition of mycelial growth for both nanocarrier formulations and both Foc races (Figure 1). Complete inhibition was achieved at 1000 $\mu g \cdot mL^{-1}$ for TR4 and 1500 $\mu g \cdot mL^{-1}$ for STR4 with both nanocarrier types.

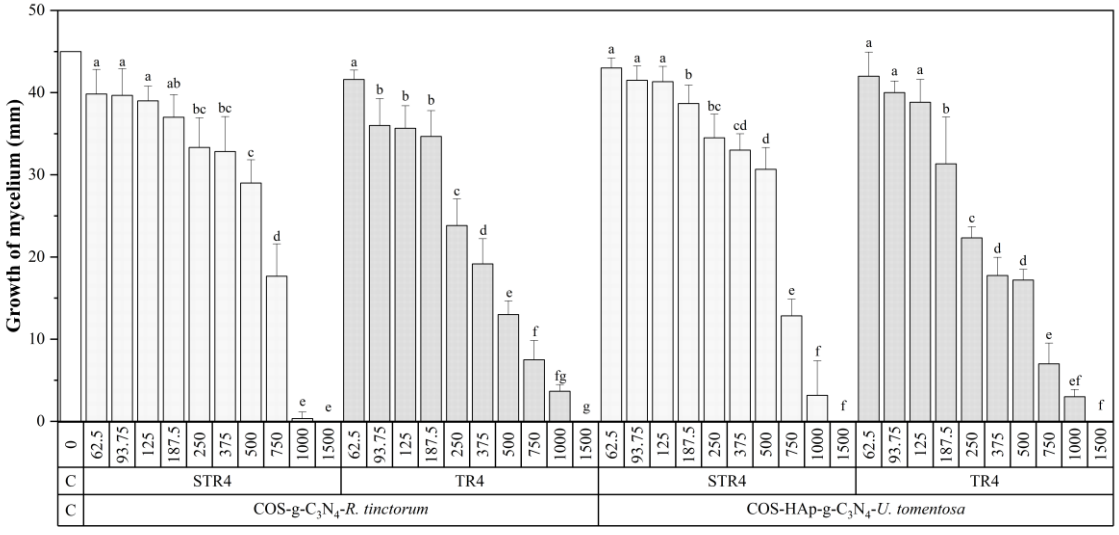


Figure 1. Mycelial growth inhibition of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* STR4 and TR4 at different concentrations of (**a**) COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* and (**b**) COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* nanocarriers. Error bars represent standard deviations (*n* = 6).

When comparing with previously reported antifungal activities of these nanocarrier systems against other phytopathogens [19,20], the efficacy against Foc, particularly TR4, is comparable to that observed against *Sclerotinia sclerotiorum* (EC_{50} = 149.3 $\mu g \cdot mL^{-1}$) and *Botrytis cinerea* (EC_{50} = 123.9 $\mu g \cdot mL^{-1}$). This suggests that these nanocarrier formulations may have broad-spectrum antifungal activity against various plant pathogens.

3.3. Mechanism of Action and Advantages of Nanocarrier Systems

The enhanced efficacy of the plant extracts when encapsulated in nanocarriers can be attributed to several factors. The nanocarrier systems protect the bioactive compounds from degradation, improve their water solubility and bioavailability, and allow for controlled release in response to specific stimuli [22].

In the case of chitosan-based nanocarriers, the release of encapsulated compounds is primarily triggered by enzymatic degradation of the chitosan moiety, which can occur in the presence of fungal chitinases and chitosanases [23]. This provides a targeted release mechanism, as the bioactive compounds are released in higher concentrations in the vicinity of the fungal pathogen.

Moreover, the chitosan component itself contributes to the antifungal activity through various mechanisms, including direct interaction with fungal cell walls, disruption of membrane permeability, chelation of trace elements, and inhibition of mRNA synthesis [24]. The *g*-C_3N_4 and HAp components enhance the stability and functionality of the nanocarrier systems, allowing for more efficient encapsulation and release of the bioactive compounds [19,20].

The plant extracts used in this study contain various bioactive compounds with reported antifungal activity. *R. tinctorum* extract is rich in anthraquinones, particularly alizarin and purpurin, which have been shown to inhibit fungal growth by disrupting cell membranes and interfering with cellular respiration [13]. *U. tomentosa* extract contains alkaloids, quinovic acid glycosides, and polyphenols that exhibit antimicrobial activity through multiple mechanisms, including inhibition of ergosterol biosynthesis and disruption of cell wall integrity [14].

The synergistic action of the nanocarrier components and the encapsulated plant extracts likely contributes to the enhanced antifungal efficacy observed in this study. This multimodal action may also reduce the risk of developing fungicide resistance, which is a significant advantage over conventional single-target synthetic fungicides.

3.4. Potential Applications and Future Perspectives

The promising *in vitro* results obtained in this study suggest that chitosan-based nanocarriers loaded with natural plant extracts could be effective tools for managing the Fusarium wilt of banana, particularly against the highly virulent TR4 race. These formulations could be applied as preventive treatments in areas at risk of Foc introduction or as part of an integrated management strategy in already affected areas.

Several application methods could be explored, including soil drenching, foliar spraying, or root dipping of planting material. The compatibility of these nanocarrier formulations with existing agricultural practices and their potential integration into current management strategies should be investigated in future studies.

Field trials are necessary to validate the efficacy of these formulations under real-world conditions and to assess factors such as persistence in soil, impact on non-target organisms, and compatibility with other agricultural inputs. Additionally, the scalability and cost-effectiveness of producing these nanocarrier formulations at a commercial scale need to be evaluated.

Future research should also explore the potential of these nanocarrier systems for delivering other bioactive compounds, such as elicitors of plant defense responses or beneficial microorganisms, which could further enhance their efficacy in managing the Fusarium wilt of banana.

4. Conclusions

This study demonstrates the potential of chitosan-based nanocarriers loaded with natural plant extracts as a promising strategy for controlling the Fusarium wilt of banana caused by Foc TR4. Both COS-*g*-C_3N_4-*R. tinctorum* and COS-HAp-*g*-C_3N_4-*U. tomentosa* nanocarrier formulations exhibited significant antifungal activity against Foc TR4 and STR4 *in vitro*, with EC_{50} values of 328.2 and 291.7 $\mu g \cdot mL^{-1}$ against TR4, respectively.

The encapsulation of plant extracts in nanocarriers offers several advantages, including protection of bioactive compounds, improved bioavailability, and controlled release in response to specific stimuli. These features, combined with the intrinsic antimicrobial properties of chitosan, contribute to the enhanced efficacy observed in this study.

While further research is needed to validate these findings under field conditions, our results provide a foundation for developing sustainable alternatives to conventional fungicides for managing the Fusarium wilt of banana. This approach

aligns with the growing demand for environmentally friendly plant protection strategies and could contribute to the long-term sustainability of banana production in the face of the TR4 threat.

Author Contributions: Conceptualization, E.S.-H., C.G.-L.-C, and P.M.-R.; methodology, E.S.-H., C.G.-L.-C, and A.V.-C.; validation, E.S.-H., C.G.-L.-C., and P.M.-R.; formal analysis, E.S.-H., C.G.-L.-C., and P.M.-R.; investigation, E.S.-H., C.G.-L.-C., A.V.-C., A.S.-A., C.C.-M., J.M.-G., and P.M.-R.; resources, C.G.-L.-C., J.M.-G., and P.M.-R.; data curation, E.S.-H.; and C.G.-L.-C.; writing—original draft preparation, E.S.-H., and P.M.-R.; writing—review and editing, E.S.-H. and P.M.-R.; visualization, E.S.-H.; project administration, C.G.-L.-C., J.M.-G., and P.M.-R.; funding acquisition, C.G.-L.-C., J.M.-G., and P.M.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Junta de Castilla y León under project VA148P23, with FEDER co-funding, and by extraordinary grants for the incorporation of tenured scientists ope 2020-2021. Reference 2024ICT246.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. OECD-FAO. (2021). OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. OECD Publishing, Paris.
2. ASPROCAN. (2020). Asociación de Organizaciones de Productores de Plátanos de Canarias. Annual Report.
3. López-Cepero, J., Puerta, M., & Piedra Buena, A. (2014). *Cuadernos Divulgativos COPLACA*, 2. 44 pp.
4. Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E. S., & Staver, C. P. (2018). Fusarium wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468.
5. Bubici, G., Kaushal, M., Prigigallo, M. I., Gómez-Lama Cabanás, C., & Mercado-Blanco, J. (2019). Biological control agents against Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 10, 616.
6. Ploetz, R. C. (2015). Fusarium wilt of banana. *Phytopathology*, 105(12), 1512-1521.
7. Ploetz, R. C. (2015). Management of Fusarium wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4. *Crop Protection*, 73, 7-15.
8. Olivares Campos, B. (2023). The first report of Fusarium wilt tropical race 4 affecting banana crops in Venezuela. In The Latin American Studies Book Series. Springer, Cham.
9. Dita, M., Echegoyen, P. E., & Pérez-Vicente, L. (2020). Plan for the prevention of the introduction and management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in the greater Caribbean region. *Acta Horticulturae*, 1272, 45-56.
10. Dale, J., James, A., Paul, J. Y., Khanna, H., Smith, M., Peraza-Echeverria, S., ... & Harding, R. (2017). Transgenic Cavendish bananas with resistance to Fusarium wilt tropical race 4. *Nature Communications*, 8(1), 1-8.
11. Martín-Esquivel, J. L., Santana-Pérez, F., Santana-Casiano, M., López-Díez, A., González-Dávila, M., & Bernardos, S. (2013). Estudio preliminar sobre la vulnerabilidad del cambio climático en Canarias. Gobierno de Canarias.
12. Toffolatti, S. L., Prandato, M., & Eder, R. (2023). Basic Substances as Bio-Based Crop Protection Products: A review. *Plants*, 12, 3152.
13. Langa-Lomba, N., Sánchez-Hernández, E., Buzón-Durán, L., González-García, V., Casanova-Gascón, J., Martín-Gil, J., & Martín-Ramos, P. (2021). Activity of anthracenediones and flavoring phenols in hydromethanolic extracts of *Rubia tinctorum* against grapevine phytopathogenic fungi. *Plants*, 10(8), 1527.
14. Sánchez-Hernández, E., Martín-Ramos, P., Martín-Gil, J., Santiago-Aliste, A., Hernández-Navarro, S., Oliveira, R., & González-García, V. (2022). Bark extract of *Uncaria tomentosa* L. for the control of strawberry phytopathogens. *Horticulturae*, 8(8), 672.
15. Vega-Vásquez, P., Mosier, N. S., & Irudayaraj, J. (2020). Nanoscale drug delivery systems: From medicine to agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 79.

16. Maluin, F. N., & Hussein, M. Z. (2020). Chitosan-based agronanochemicals as a sustainable alternative in crop protection. *Molecules*, 25(7), 1611.
17. Rajabzadeh-Khosroshahi, M., Pourmadadi, M., Yazdian, F., Rashedi, H., Navaei-Nigjeh, M., & Rasekh, B. (2022). Chitosan/agarose/graphitic carbon nitride nanocomposite as an efficient pH-sensitive drug delivery system for anticancer curcumin releasing. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 74, 103443.
18. Hemmati, K., Ahmadi Nasab, N., Hesaraki, S., & Nezafati, N. (2021). In vitro evaluation of curcumin-loaded chitosan-coated hydroxyapatite nanocarriers as a potential system for effective treatment of cancer. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 32(10), 1267-1287.
19. Santiago-Aliste, A., Sánchez-Hernández, E., Langa-Lomba, N., González-García, V., Casanova-Gascón, J., Martín-Gil, J., & Martín-Ramos, P. (2022). Multifunctional nanocarriers based on chitosan oligomers and graphitic carbon nitride assembly. *Materials*, 15(24), 8981.
20. Santiago-Aliste, A., Sánchez-Hernández, E., Buzón-Durán, L., Marcos-Robles, J. L., Martín-Gil, J., & Martín-Ramos, P. (2023). *Uncaria tomentosa*-loaded chitosan oligomers–hydroxyapatite–carbon nitride nanocarriers for postharvest fruit protection. *Agronomy*, 13(9), 2189.
21. Dante, R. C., Martín-Ramos, P., Sánchez-Arévalo, F. M., Huerta, L., Bizarro, M., Navas-Gracia, L. M., & Martín-Gil, J. (2013). Synthesis of crumpled nanosheets of polymeric carbon nitride from melamine cyanurate. *Journal of Solid State Chemistry*, 201, 153-163.
22. Machado, T. O., Grabow, J., Sayer, C., de Araújo, P. H. H., Ehrenhard, M. L., & Wurm, F. R. (2022). Biopolymer-based nanocarriers for sustained release of agrochemicals: A review on materials and social science perspectives for a sustainable future of agri- and horticulture. *Advances in Colloid and Interface Science*, 303, 102645.
23. Ma, Z., Garrido-Maestu, A., & Jeong, K. C. (2017). Application, mode of action, and in vivo activity of chitosan and its micro- and nanoparticles as antimicrobial agents: A review. *Carbohydrate Polymers*, 176, 257-265.
24. Xia, W., Liu, P., & Liu, J. (2008). Advance in chitosan hydrolysis by non-specific cellulases. *Bioresource Technology*, 99(15), 6751-6762.

Capsicum Secondary Metabolites: A Sustainable Approach for Controlling Soil-borne Diseases in Cucurbits

Eva Sánchez-Hernández [1], Ana Garcés-Claver [2], Oreto Fayos-Avellán [2], Vicente González-García [3], Jesús Martín-Gil [1], Pablo Martín-Ramos [1,*]

1 Department of Agricultural and Forestry Engineering, ETSIIAA, University of Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, Spain

2 Department of Plant Science, Agrifood Research and Technology Centre of Aragón, Instituto Agroalimentario de Aragón—IA2 (Universidad de Zaragoza-CITA), Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza, Spain

3 Department of Plant Protection, Institute of Agricultural Sciences (ICA-CSIC), Calle Serrano 115 Dup 28006 Madrid, Spain

* Correspondence: pmr@uva.es

Abstract: Soil-borne diseases pose significant challenges to cucurbit production, necessitating the development of sustainable control strategies. This study investigates the antifungal potential of secondary metabolites from *Capsicum* fruits, specifically capsaicinoids and capsinoids, against *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary. Two distinct *Capsicum chinense* Jacq. genotypes were evaluated: cultivar 'C-449', characterized by high capsaicinoid and low capsinoid content, and its mutant 'C-449_mutate', which exhibits high capsinoid and low capsaicinoid levels. The bioactive compounds were extracted using an ultrasonication-assisted method in a hydroalcoholic medium. Characterization of the extracts by infrared spectroscopy confirmed structural differences between capsaicinoids and capsinoids, identifiable by characteristic bands in the amide and ester groups, respectively. *In vitro* assays demonstrated that both extracts effectively inhibited the growth of the phytopathogen, with the extract from 'C-449' fruits being significantly more effective (EC_{50} = 111.2 µg/mL, EC_{90} = 175.3 µg/mL) than that from 'C-449_mutate' fruits (EC_{50} = 203.4 µg/mL, EC_{90} = 319.1 µg/mL). When compared with commercial synthetic fungicides, the extracts showed superior efficacy to azoxystrobin and fosetyl-Al. Although the high-capsaicinoid extract showed greater efficacy, its high pungency may limit practical applications, whereas the low-pungency mutant extract offers a safer alternative for both crop treatment and handler safety without affecting product flavor. These findings suggest that *C. chinense* extracts represent a promising alternative as natural biofungicides for the sustainable control of *S. sclerotiorum* and potentially other soil-borne pathogens in cucurbit crops.

Keywords: biofungicides, *Capsicum*, capsaicinoid, capsinoid, cucurbits, pungency, *Sclerotinia sclerotiorum*, secondary metabolites

1. Introduction

Capsicum chinense Jacq. is one of the five most important species among the more than 200 domesticated varieties of the genus *Capsicum*. One of its most notable varieties is 'Bhut Jolokia', also known as 'ghost pepper', which is characterized by its horn-like shape and an extraordinary level of pungency [1]. This chili reaches more than 1,000,000 units on the Scoville scale, equivalent to 125 jalapeños [2].

Originally from the northeastern region of India and Bangladesh, 'Bhut Jolokia' stands out not only for its culinary use but also for its medicinal and defensive properties [3]. Its nutritional and therapeutic value is due to the presence of various bioactive compounds, including carotenoids, capsaicinoids, essential oils, vitamins C and E, and compounds with antifungal and antibacterial properties. These characteristics explain its traditional use in Chinese medicine for the treatment of various ailments and as a natural pest repellent [4].

In the genus *Capsicum*, two main groups are distinguished: hot and sweet peppers. The pungency in hot varieties is mainly due to the presence of capsaicinoids. The most important capsaicinoids are capsaicin (CAP) and dihydrocapsaicin (DHC), which represent approximately 90% of the total content of pungent compounds. On the other hand, capsinoids, present in low-pungency varieties, are less irritating analog compounds that have similar antifungal, antimicrobial, and anti-inflammatory properties [4].

Recent studies have shown that the difference in pungency level between varieties is mainly due to mutations in the gene encoding the aminotransferase *pAMT*. Specifically, in *C. chinense*, these mutations are the main genetic factor responsible for the low level of pungency [5]. Capsinoids, which produce a burning sensation approximately 1000 times lower than that of capsaicinoids, have gained interest due to their potential health benefits, including anticancer, anti-arthritic effects, and benefits for the digestive system and gallbladder [6]. Their lower pungency facilitates the consumption of fruits with high concentrations of these beneficial compounds. This combination of properties makes these compounds particularly interesting for both the pharmaceutical industry and agricultural production, especially in the development of natural biofungicides for crop protection.

The pathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary causes white mold, a disease that can develop during the growing season, as well as in the post-harvest period [7]. It affects a wide variety of hosts —over 600 plant species worldwide—, mainly dicotyledonous plants of the Solanaceae, Cruciferae, Umbelliferae, Asteraceae, Chenopodiaceae, and Leguminosae families, as well as a few monocotyledons of the Amaryllidaceae and Liliaceae families [8]. The most important affected commercial crops are rapeseed, soybeans, sunflowers, green

beans, lettuce, potatoes and carrots, legumes (chickpeas and pulses), stone fruits, tomatoes, celery, and cucurbits [9]. This wide range of hosts limits control methods, as the number of non-host crops available for crop rotation is limited.

Sclerotinia sclerotiorum causes significant economic losses worldwide by attacking different parts of the plant, including stems, leaves, flowers, and fruits, leading to reduced plant yield and quality [10]. The symptoms caused by *S. sclerotiorum* vary to some extent depending on the host, infection pathways, and environmental conditions. The fungus can infect the aerial parts of crops and cause flower wilting, stem rot, fruit rot, and head blight. Aerial infections are important, considering that the fungus can release millions of spores that are dispersed by wind. Moreover, *S. sclerotiorum* can also infect the roots and/or crowns of plants. The fungus penetrates the host's cuticle through mechanical pressure. An enzymatic process affects the lamella between cells, rapidly disorganizing tissues after penetration. From then on, symptoms may differ among host crops, but there are a number of similarities. The most shared symptoms are light brown or grayish-white, water-soaked spots that develop on leaves and stems, and the formation of white, cotton-like mycelium on leaves, stems, and petioles. Secondary symptoms that appear as fungal activity progresses are water-soaked lesions, wilting, as well as whitening and crushing of plant parts [8].

Cucurbitaceae is the second largest horticultural family in terms of economic importance after Solanaceae, including major crops such as watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai), melon (*Cucumis melo* L.), cucumber (*Cucumis sativus* L.), and pumpkin, squash, and zucchini (*Cucurbita* genus). These crops are particularly susceptible to soil-borne pathogens, with *S. sclerotiorum* representing a significant threat to their cultivation across Mediterranean regions. Traditional control methods rely heavily on synthetic fungicides, which face increasing concerns regarding resistance development, environmental impact, and regulatory restrictions. For instance, mancozeb, one of the most effective fungicides against this pathogen, has recently been banned in Europe, creating an urgent need for sustainable alternatives.

The natural allelic diversity in the *pAMT* gene of the genus *Capsicum* not only determines the levels of capsaicinoids and, therefore, the degree of pungency in the fruits, but also modulates the global composition of the secondary metabolite profile. This phytochemical variation could directly correlate with significant differences in the antimicrobial potential of *C. chinense*, particularly in its ability to inhibit the development of fungal pathogens of agricultural importance such as *S. sclerotiorum*. The aim of this study was to evaluate the antifungal activity of extracts from two *C. chinense* genotypes with contrasting capsaicinoid and capsinoid profiles

against *S. sclerotiorum* and to compare their efficacy with commercial synthetic fungicides. While the high-capsaicinoid variety may demonstrate superior fungicidal properties, its pungency could limit practical applications in cucurbit crops due to potential flavor alterations and handler safety concerns. Conversely, the low-pungency capsinoid-rich mutant could offer a more adaptable solution that balances efficacy and applicability in sustainable cucurbit farming systems. This research represents the first step toward developing a comprehensive biocontrol strategy against multiple soil-borne pathogens affecting cucurbit crops, with future work planned to extend these investigations to other significant pathogens such as *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* (E.F.Sm. ex Wollenw.) W.C.Snyder & H.N.Hansen, *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid., *Neocosmospora falciformis* (Carrión) L.Lombard & Crous, and *Neocosmospora keratoplastica* (Geiser, O'Donnell, D.P.G.Short & Ning Zhang) Sand.-Den. & Crous.

2. Materials and Methods

2.1. Reagents, Plant Material, and Fungal Isolate

Methanol (CAS 67-56-1) and potato dextrose agar (PDA) were supplied by Sigma Aldrich Química S.A. (Madrid, Spain). Commercial fungicides were used for comparative purposes, namely Ortiva® (azoxystrobin 25%; Syngenta, Basel, Switzerland), Vondozeb® (mancozeb 75%; UPL Iberia, Barcelona, Spain), and Fesil® (fosetyl-Al 80; Bayer, Leverkusen, Germany), were provided by the Plant Health and Certification Center (CSCV) of the Government of Aragon (Zaragoza, Spain). Fruits of *C. chinense* cultivar 'C-449', its mutant 'C-449_mutate', and a subculture of *S. sclerotiorum* were kindly supplied by the Plant Science Department of the Center for Research and Agrifood Technology of Aragon (CITA, Zaragoza, Spain).

2.2. Extraction Procedure

Freeze-dried fruit samples were mixed (1:20 *w/v*) with a methanol/water solution (1:1 *v/v*) and heated in a water bath at 50°C for 30 min, followed by sonication for 5 min in pulse mode, with a 1 min stop every 2.5 min, using a probe-type ultrasonicator model UP400St from Hielscher Ultrasonics (Teltow, Germany). The solution was then centrifuged at 9,000 rpm for 15 minutes and the supernatant was filtered through Whatman No. 1 paper.

2.3. Characterization of the Extracts

A Thermo Scientific Nicolet iS50 Fourier transform infrared spectrometer (Waltham, MA, USA) with an integrated diamond attenuated total reflection (ATR) system was used to collect the infrared vibrational spectra of the plant organs. The spectra were

recorded between 400 and 4000 cm^{-1}, with a spectral resolution of 1 cm^{-1}, collating 64 scans.

2.4. Evaluation of Antifungal Activity

The antifungal activity of *C. chinense* (cv. 'C-449' and 'C-449_mutant') fruit extracts was determined using the agar dilution method according to EUCAST standard antifungal susceptibility testing procedures [11]. Aliquots of the stock solution were incorporated into the PDA medium to produce final concentrations ranging from 62.5 to 1500 µg/mL. Mycelial plugs (⌀ = 5 mm), from the margin of 1-week-old PDA cultures of *S. sclerotiorum*, were transferred to the center of PDA plates prepared with the aforementioned concentrations (3 plates per treatment and concentration, with 2 duplicates). The plates were incubated at 25 °C in the dark for 1 week. The control consisted of replacing the extract with the solvent used for extraction (i.e., methanol 1:1 *v/v*) in the PDA medium. Mycelial growth inhibition was estimated according to the formula $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, where d_c and d_t represent the average diameters of the control and treated fungal colonies, respectively. Effective concentrations (EC_{50} and EC_{90}) were determined through PROBIT analysis in IBM SPSS Statistics v.25 (IBM, New York, NY, USA).

2.5. Statistical analysis

Since the requirements of homogeneity and homoscedasticity were met (according to the Shapiro-Wilk and Levene tests, respectively), the results of mycelial growth inhibition were statistically analyzed in IBM SPSS Statistics v.25 through a one-way analysis of variance (ANOVA), followed by a *post hoc* comparison of means using Tukey's test at $p < 0.05$.

3. Results and Discussion

3.1. Vibrational characterization of the extracts

Examination of the infrared spectral bands of the hot pepper (genotype 'C-449' with high capsaicinoid content) and its corresponding mutant (rich in capsinoids) (Table 1) revealed changes in wavenumbers and intensity that are useful for differentiation purposes. Such changes are consistent with those reported in the literature [12].

Table 1. Assignment of the main bands of the ATR-FTIR spectrum of hot and low-pungency pepper extracts.

Wavenumber (cm^{-1})		Assignment
cv. 'C-449'	cv. 'C-449_mutant'	
3348	–	N–H stretching amide group
3251	3284	O–H stretching
2927	2923	asymmetric C–H stretching
2853	2853	symmetric aliphatic C–H stretching
1718	1738	C=O vibrations
1641	–	amide II C=O stretching [typical of capsaicin]
1599	1599	C=C stretching (aromatics)
1517	–	N–H bending and C–N stretching (amide II) [typical of capsaicin]
1402	1402	symmetric C–H bending or C–O–H stretching
1236	1235	C=O stretching; asymmetric C–O–C stretching
1099	1099	C–O stretching
1050	1049	C–O stretching of the methoxylated aromatic ring
1026	1026	vibrations associated with aromatic ring substituents
918	919	O–H bending; out-of-plane bending (alkenes)
869	869	out-of-plane bending (aromatics); C–C stretching
817	817	out-of-plane C–H bending (ring vibration)
777	776	out-of-plane bending (aromatics)

The variations must be attributed to the presence of capsaicin in the hot pepper and capsiate in the mutant. Capsaicin contains an amide group (–CONH–) in its structure, while capsiate has an ester group (–COO–) (Figure 1).

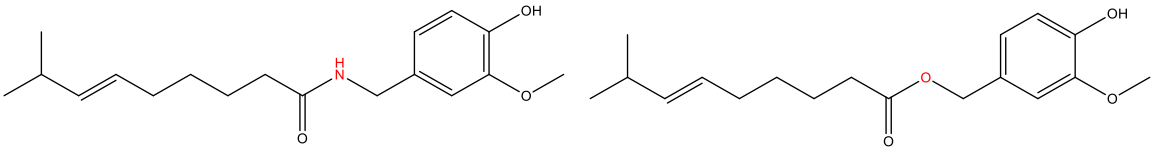


Figure 1. Chemical structures of capsaicin (*left*) and capsiate (*right*).

Capsaicin shows a characteristic band of C=O stretching of the amide II group around 1630–1650 cm^{-1} [13] and another near 1520 cm^{-1} —also from the amide II group— resulting from the coupling of N–H bending and C–N stretching bands [14]. The presence of such bands in the spectrum of the hot genotype and their absence in the spectrum of the mutant are entirely elucidative.

The position of the C=O peak in the 1710–1750 cm^{-1} range varies significantly from the hot to low-pungency mutant, consistent with the relative contents of capsaicin and capsiate: while in the hot variety an intense peak is observed at 1718 cm^{-1} corresponding to the C=O stretching of the amide group of capsaicin, in the case of the mutated variety the C=O peak is shifted to 1738 cm^{-1}, in the region of non-conjugated esters, that is, of capsiates. The absence of resonance with the amide group increases the vibrational energy of the carbonyl. The difference of 20 cm^{-1} between both varieties allows the distinction to be evident even in matrices as complex as plant extracts.

If the analysis is extended to the 1000–1300 cm^{-1} interval, the region of C–O bonds, we observe common bands in both spectra, but with greater intensity in the spectrum of the low-pungency variety (particularly in the case of the band at 1235 cm^{-1}). This is because capsiate, being an ester, exhibits additional bands of asymmetric and symmetric stretching of the C–O–C bond that are less prominent in capsaicin.

Finally, consideration of the 3200–3600 cm^{-1} region leads us to observe the broad band due to O–H stretching, expected for both varieties, due to the common presence in their characteristic molecules of the hydroxyl group (–OH) in the aromatic ring. However, capsaicin also includes an N–H bond, which contributes to this region with an additional signal in the region of 3350 cm^{-1} (N–H stretching).

3.2. In Vitro Antifungal Activity

Figure 2 shows the mycelial growth of the phytopathogen *S. sclerotiorum* in the presence of hydromethanolic extracts obtained from *C. chinense* fruits of cv. 'C-449' and its mutant 'C-449_mutant'. The results demonstrate that the extract derived from 'C-449' fruits exhibited significantly superior inhibitory efficacy compared to the extract from 'C-449_mutant' fruits, achieving complete inhibitions at concentrations of 250 and 375 µg/mL, respectively.

Table 2 presents the effective concentrations that inhibit the mycelial growth of *S. sclerotiorum* by 50% (EC_{50}) and 90% (EC_{90}). The cv. 'C-449' fruit extract showed notably superior antifungal activity, with values below 180 µg/mL for both parameters, while the cv. 'C-449_mutant' fruit extract required higher concentrations, with an EC_{50} of 203.4 µg/mL and an EC_{90} of 319.1 µg/mL. These findings demonstrate a higher sensitivity of the pathogen S*. sclerotiorum* to the bioactive compounds present in 'C-449' fruits of *C. chinense*, associated with their higher content of capsaicinoids.

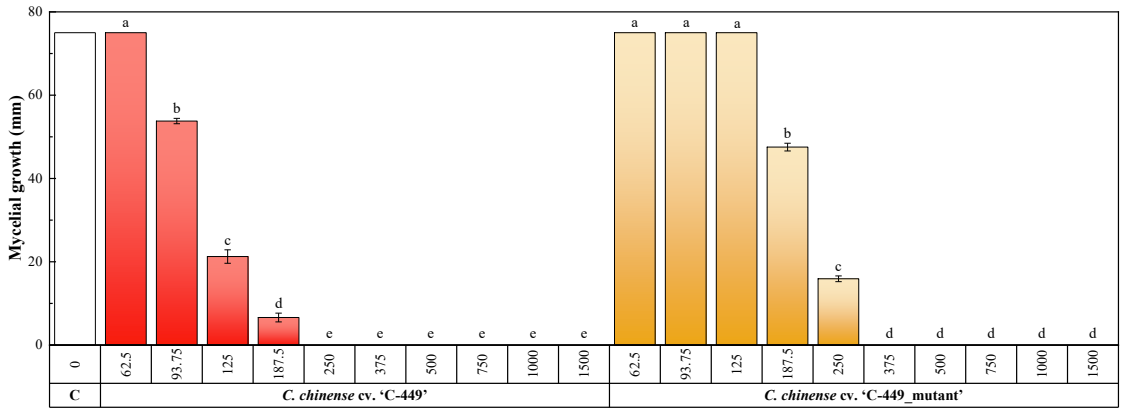


Figure 2. Mycelial growth inhibition obtained with *C. chinense* cv. 'C-449' and 'C-449_mutant' fruit extracts against *S. sclerotiorum* at concentrations between 62.5 and 1500 µg/mL. Error bars

represent standard deviations. The same letters above concentrations indicate they are not significantly different at $p < 0.05$.

Table 2. Effective concentrations EC_{50} and EC_{90} of hot and non-pungent *C. chinense* fruit extracts against *S. sclerotiorum*.

Effective concentration (µg/mL)	*C. chinense* cv. 'C-449'	*C. chinense* cv. 'C-449_mutant'
EC_{50}	111.2	203.4
EC_{90}	175.3	319.1

3.3. Comparisons of the Efficacy of the Extracts with Conventional Fungicides

Table 3 presents the results of mycelial growth inhibition of *S. sclerotiorum* using three conventional synthetic fungicides, chosen for comparison purposes. The highest inhibition rates were observed for the dithiocarbamate fungicide (mancozeb), which completely inhibited the mycelial growth of the phytopathogen at one-tenth of the dose recommended by the manufacturer (i.e., at 150 µg/mL). The organophosphate (fosetyl-Al) and the strobilurin (azoxystrobin) fungicides were less effective, being unable to completely inhibit the growth of the pathogen at their recommended doses, i.e., 2000 µg/mL and 62,500 µg/mL, respectively.

Table 3. Mycelial growth of *S. sclerotiorum* in the *in vitro* assays conducted in a PDA medium with two concentrations (the dose recommended by the manufacturer and one-tenth of it) of three commercial synthetic fungicides.

Commercial fungicide	Mycelial growth (mm)			Inhibition (%)	
	Control (PDA)	Rd/10	Rd*	Rd/10	Rd*
Azoxystrobin	75.0	14.0	9.0	81.3	88.0
Mancozeb	75.0	0.0	0.0	100.0	100.0
Fosetyl-Al	75.0	75.0	13.3	0.0	82.2

*Rd represents the recommended dose, i.e., 62.5 mg/mL of azoxystrobin (250 g/L for Ortiva®, azoxystrobin 25%), 1.5 mg/mL of mancozeb (2 g/L for Vondozeb®, mancozeb 75%) and 2 mg/mL of fosetyl-Al (2.5 g/L for Fosbel®, fosetyl-Al 80%). The mycelial growth of the control (PDA) was 75 mm. All mycelial growth values (in mm) are mean values ($n = 3$).

When comparing the efficacy of the *Capsicum* extracts with these conventional fungicides, both extracts outperformed azoxystrobin and fosetyl-Al. This is particularly significant given that these synthetic fungicides are commonly used in cucurbit production systems, yet they demonstrated limited effectiveness against *S. sclerotiorum* even at their recommended doses. While mancozeb showed superior performance to both extracts, this fungicide has recently been banned in Europe due to environmental and health concerns, highlighting the timely relevance of our findings.

In line with the logic underlying the use of synthetic fungicides in pairs (not only to help prevent the development of resistance but also to benefit from the greater efficacy resulting from the different modes of action), the better performance of the natural product compared to some conventional fungicides can be tentatively

attributed to the complex mixture of compounds found in the plant extract, given that these compounds can act synergistically to produce a more potent antifungal effect than synthetic fungicides based on a single molecule.

It is important to note that while the high-capsaicinoid extract ('C-449') demonstrated superior antifungal properties, its high pungency could present practical limitations for field applications in cucurbit crops. The intense pungency might potentially alter crop flavor profiles, pose safety concerns for handlers during application, and require additional precautions during harvest and processing. In contrast, the capsinoid-rich, low-pungency extract ('C-449_mutant'), despite showing slightly lower efficacy, offers a more versatile solution that balances effectiveness with practical applicability. This makes the mutant extract potentially more suitable for integration into sustainable management practices for cucurbit crops, where maintaining product quality and ensuring handler safety are important considerations.

3.4. Comparison with other Extracts Tested in vitro against S. sclerotiorum

Table 4 presents a comparison of the efficacies described in the literature for plant extracts and essential oils against *S. sclerotiorum*. It is important to be careful when interpreting these results, as sensitivity may vary depending on the isolate and results may be expressed in different ways (MIC values, inhibition rates, inhibition zones, etc.).

Table 4. Efficacy of plant extracts and essential oils described in the literature against *S. sclerotiorum*.

Source/extraction medium	Plant	Efficiency	Reference
Hydromethanolic extract	*C. chinense* cv. 'C-449' fruits *C. chinense* cv. 'C-449_mutant' fruits	MIC = 250 µg/mL MIC = 375 µg/mL	This work
Hexane extract	*Cestrum nocturnum* L. flowers	MIC = 1000 µg/mL	[15]
Chloroform extract		MIC = 500 µg/mL	
Ethyl acetate extract		MIC = 500 µg/mL	
Methanol extract		MIC = 500 µg/mL	
Essential oils at 1, 2.5 and 5%	*Thymus vulgaris* L.	n.a.	[16]
	Nigella sativa L.	n.a.	
	Origanum majorana L.	MIC = 2.5%	
	Syzygium aromaticum (L.) Merr. & L.M.Perry	MIC = 2.5%	
	Salvia rosmarinus Spenn.	n.a.	
Essential oils at 20%	*Ocimum basilicum* L.	IR = 4.1%	[17]
	Allium sativum L.	IR = 28.2%	
	Cymbopogon citratus (DC.) Stapf	IR = 9.1%	
	Nerium oleander L.	IR = 14.1%	
	Azadirachta indica A.Juss.	IR = 35.5%	
	Allium cepa L.	IR = 16.9%	
Essential oil	*Zingiber officinale* Roscoe	MIC = 1000 µg/mL	[18]

Aqueous extracts	*Trachystemon orientalis* (L.) G.Don leaves *T. orientalis* flowers	MIC = 7% MIC = 1%	[19]
Crude extracts	*Rosmarinus officinalis* L. leaves *Salvia fruticosa* Mill. leaves	MIC = 10% MIC = 20%	[20]
Ethanolic extract	*Mentha spicata* L.	MIC = 5%	[21]
Aqueous extract	*A. sativum* leaves	MIC = 5000 µg/mL	[22]

IR: inhibition ratio; MIC: minimum inhibitory concentration; n.a.: no activity at the highest concentration tested.

The extracts derived from *C. chinense* fruits, both hot and non-pungent, demonstrated superior antifungal activity compared to the various plant extracts and essential oils documented in the consulted scientific literature. The only comparable exception was found in the ethyl acetate extract obtained from *Cestrum nocturnum* L. flowers, which exhibited inhibition levels of 250 µg/mL [15] equivalent to those achieved by the *C. chinense* cv. 'C-449' extract.

This comparative analysis further emphasizes the significant potential of *Capsicum* extracts as biocontrol agents, particularly for cucurbit crops affected by *S. sclerotiorum*. While the high-capsaicinoid extract showed remarkable efficacy, the capsinoid-rich extract from the non-pungent mutant still outperformed most other botanical extracts tested against this pathogen, making it a particularly attractive option for practical applications in sustainable agriculture where a minimal alteration to crop characteristics is desired.

3.4. Limitations of the Study and Future Research

The promising results obtained in preliminary *in vitro* assays suggest that *C. chinense* fruit extracts possess significant potential as antifungal agents against *S. sclerotiorum*. However, their effective implementation in cucurbit crop protection systems requires more comprehensive complementary research. It is imperative to conduct *ex-situ* and *in vivo* assays with various strains of the pathogen to contemplate the spectrum of sensitivity, as well as field studies in multiple species of the *Cucurbitaceae* family.

Likewise, the effect of the treatment on other pathogenic microorganisms —both fungal and bacterial— that affect these crops and have not been analyzed in the present study should be evaluated, especially if this natural alternative is to be proposed as a substitute for conventional fungicides. Our future research plans include expanding the scope to test these extracts against other significant soil-borne pathogens affecting cucurbits, particularly *F. oxysporum* f. sp. *niveum*, *M. phaseolina*, *N. falciformis*, and *N. keratoplastica*, which have been identified as major threats to melon and watermelon cultivation in Mediterranean regions.

Additional technical factors such as the optimal time of application, adequate dosage, cost-effectiveness, stability against environmental degradation, and persistence of protection must also be thoroughly studied in future research. Furthermore, given the contrasting properties of the two extracts examined —with the high-capsaicinoid extract showing superior efficacy but potential practical limitations due to its pungency, and the low-pungency extract offering a more applicable solution with slightly reduced efficacy—, investigation into optimized formulations that balance efficacy and applicability is warranted. This might include exploring conjugate complexes with biopolymers to enhance bioavailability and stability while minimizing potential flavor impacts on the treated crops.

The development of field-ready formulations will be particularly important for cucurbit crops, where maintaining fruit flavor and quality is essential. The capsinoid-rich extract from the non-pungent mutant may offer particular advantages in this context, potentially allowing for effective disease control without compromising the organoleptic properties of cucurbit fruits.

4. Conclusions

Hydromethanolic extracts from *C. chinense* 'Bhut Jolokia' exhibit significant antifungal properties against the economically important pathogen *S. sclerotiorum*. ATR-FTIR spectroscopy confirmed distinct phytochemical profiles: cv. 'C-449' variety containing predominantly capsaicinoids (amide groups) and the 'C-449_mutant' (non-pungent variety) containing capsinoids (ester groups). The extracts from cv. 'C-449' demonstrated superior efficacy (EC_{50} = 111.2 µg/mL; EC_{90} = 175.3 µg/mL) compared to the mutant (EC_{50} = 203.4 µg/mL; EC_{90} = 319.1 µg/mL), achieving complete inhibition at 250 µg/mL and 375 µg/mL, respectively.

Capsicum chinense extracts outperformed two commercial fungicides (azoxystrobin and fosetyl-Al), being surpassed only by mancozeb, which has recently been banned in Europe. Comparative analysis with other botanical extracts positions 'Bhut Jolokia' among the most effective natural alternatives against this pathogen. While the high-capsaicinoid extract demonstrated superior antifungal activity, its high pungency might limit practical applications in cucurbit crops due to potential flavor alterations and handler safety concerns. In contrast, the low-pungency capsinoid-rich extract, despite showing slightly reduced efficacy, represents a more versatile solution that balances effectiveness with practical applicability in sustainable cucurbit farming systems.

These findings suggest that *C. chinense* extracts, particularly from the non-pungent mutant, represent a viable alternative to conventional fungicides in cucurbit

production, offering a sustainable path toward reducing synthetic chemical inputs while maintaining crop protection efficiency. Future work will focus on evaluating these extracts against other significant soil-borne pathogens affecting cucurbits and developing field-ready formulations that optimize efficacy while ensuring crop quality and handler safety.

Author Contributions: Conceptualization, E.S.-H., A.G.-C., and P.M.-R.; methodology, E.S.-H., J.M.-G., M.G.-S., and V.G.-G.; validation, E.S.-H., J.M.-G., and, P.M.-R.; formal analysis, E.S.-H. and P.M.-R.; investigation, E.S.-H., A.G.-C., O.F.-A., V.G.-G., J.M.-G., and P.M.-R.; resources, A.G.-C. and J.M.-G.; writing—original draft preparation, E.S.-H. and P.M.-R.; writing—review and editing, E.S.-H. and P.M.-R.; visualization, E.S.-H.; project administration, A.G.-C.; funding acquisition, A.G.-C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was supported by the Spanish Ministry of Education, Science, and Universities – State Research Agency, Knowledge Generation Call 2023, through project PID2023-151202OB-C22.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Rastogi, V.; Porwal, M.; Sikarwar, M.S.; Singh, B.; Choudhary, P.; Mohanta, B.C. A review on phytochemical and pharmacological potential of Bhut Jolokia (a cultivar of *Capsicum chinense* Jacq.). *J. Appl. Pharm. Sci.* **2024**, *14* (05), 79–90.
2. Rakesh, V.; Patgiri, P.; Borah, A. Laboratory study of repellent property of Bhut Jolokia chilli against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) in stored wheat. *J. Entomol. Sci.* **2024**, *59* (2), 156–164.
3. Yogindran, S.; Kumar, M.; Sahoo, L.; Saha, S.; Madhuri, K. Occurrence of Cotton leaf curl Multan virus and associated betasatellites with leaf curl disease of Bhut-Jolokia chillies (*Capsicum chinense* Jacq.) in India. *Mol. Biol. Rep.* **2021**, *48*, 2143–2152.
4. Costa, J.; Sepúlveda, M.; Gallardo, V.; Cayún, Y.; Santander, C.; Ruíz, A.; Reyes, M.; Santos, C.; Cornejo, P.; Lima, N.; Santos, C. Antifungal potential of capsaicinoids and capsinoids from the *Capsicum* genus for the safeguarding of agrifood production: Advantages and limitations for environmental health. *Microorganisms* **2022**, *10* (12), 2387.
5. Tanaka, Y.; Nakashima, F.; Kirii, E.; Douzono, M.; Yamada, T.; Kamio, S.; Kato, K. Difference in capsaicinoid biosynthesis gene expression in the pericarp reveals elevation of capsaicinoid contents in chili peppers (*Capsicum chinense)*. *Plant Cell Rep.* **2017**, *36,* 267–279.
6. Bortolotti, M. Red pepper: From the kitchen to the pharmacy. *J. Gastrointest. Liver Dis.* 2013, *22,* 253–256.
7. Bolton, M.D.; Thomma, B.P.H.J.; Nelson, B.D. *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary: Biology and molecular traits of a cosmopolitan pathogen. *Mol. Plant Pathol.* **2006**, *7,* 1–16.
8. Albert, D.; Dumonceaux, T.; Carisse, O.; Beaulieu, C.; Filion, M. Combining desirable traits for a good biocontrol strategy against *Sclerotinia sclerotiorum. Microorganisms* **2022**, *10* (6), 1189.
9. Khangura, R.; Burgel, A.J. Foliar fungicides and their optimum timing reduce *Sclerotinia* stem rot incidence, improve yield and profitability in canola (*Brassica napus* L.). *Indian Phytopathol.* **2021**, *74,* 549–558.
10. Sharma, P.; Meena, P.D.; Verma, P.R.; Saharan, G.S.; Mehta, N.; Singh, D.; Kumar, A. *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib) de Bary causing Sclerotinia rot in oilseed Brassicas: A review. *J. Oilseed Brassica* **2016**, *1,* 1–44.
11. Arendrup, M.C.; Cuenca-Estrella, M.; Lass-Flörl, C.; Hope, W.; EUCAST-AFST. EUCAST technical note on the EUCAST definitive document EDef 7.2: Method for the determination of broth dilution minimum inhibitory concentrations of antifungal agents for yeasts EDef 7.2 (EUCAST-AFST). *Clin. Microbiol. Infect.* **2012**, *18,* E246–E247.

12. El Kaaby Ekhlas, A.; Al Hattab Zahra, N.; AI-Anny Jenan, A. FT-IR Identification of capsaicin from callus and seedling of chilli pepper plants *Capsicum annuum* L. *in vitro*. *Int. J. Multidiscip. Curr. Res.* **2016**, 4, 1144-1146.
13. Oliveira Junior, N.; Padulla, V.; Flores, I.; Annunciação, D.; Neiva, M.; Brant, V. Evaluation of natural capsaicin (N.Cap) in pepper spray by GC-MS/FID, NMR and HPLC as an alternative to the use of oleoresin capsicum (OC). *Hum. Factors Mech. Eng. Def. Saf.* **2019**, 3, 8, doi:10.1007/s41314-019-0024-6.
14. Mondal, R.; Bobde, Y.; Ghosh, B.; Giri, T.K. Development and characterization of a phospholipid complex for effective delivery of capsaicin. *Indian J. Pharm. Sci.* **2019**, 81, 1011-1019, doi:10.36468/pharmaceutical-sciences.598.
15. Al-Reza, S.M.; Rahman, A.; Ahmed, Y.; Kang, S.C. Inhibition of plant pathogens *in vitro* and *in vivo* with essential oil and organic extracts of *Cestrum nocturnum* L. *Pestic. Biochem. Physiol.* **2010**, *96,* 86–92.
16. Ahmed, G.; Elsisi, A. Efficacy of compost and some essential oils alone or in combination in controlling cucumber white mould disease under protected house conditions. *J. Plant Prot. & Pathol.* **2020**, *11,* 291–297.
17. Elbatawy, Y.M.; Mohamed, F.G.; Eisa, N.A.; El-Habbak, M.H. Evaluation of some biological agents and plant extracts for controlling cucumber white rot caused by *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib) de Bary. *Ann. Agric. Sci. Moshtohor* **2020**, *58,* 351–364.
18. Hussein, K.A. Antifungal activity and chemical composition of ginger essential oil against ginseng pathogenic fungi. *Curr. Res. Environ. Appl. Mycol.* **2018**, *8,* 194–203.
19. Onaran, A.; Yılar, M. Antifungal and herbicidal activity of *Trachystemon orientalis* (L.) G. Don against some plant pathogenic fungi and *Cuscuta campestris* Yunck. *Iğdır Univ. J. Sci. Technol.* **2018**, *8,* 37–43.
20. Goussous, S.J.; Mas'ad, I.S.; Abu El-Samen, F.M.; Tahhan, R.A. *In vitro* inhibitory effects of rosemary and sage extracts on mycelial growth and sclerotial formation and germination of *Sclerotinia sclerotiorum. Arch. Phytopathol. Pflanzenschutz* **2013**, *46,* 890–902.
21. Al-Araji, A.M.Y.; Hasan, A.M.; Fradi, A.J.; Majeed, S.M.A.; Majeed, W.W.A.; Naji, E.T. Study of alkaloids, phenols and terpenes of *Mentha spicata* as a fungicide against *Rhizoctonia solani, Sclerotinia sclerotiorum* and *Fusarium oxysporum. Int. J. Adv. Biol. Res.* **2017**, *7,* 345–354.
22. Singh, U.P.; Pathak, K.K.; Khare, M.N.; Singh, R.B. Effect of leaf extract of garlic on *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri, Sclerotinia sclerotiorum* and on gram seeds. *Mycologia* **2018**, *71,* 556–564.

Comparación de métodos clásicos de valoración de arbolado urbano con análisis estadístico

Claudia García-Ventura [1], Natividad Buceta-Albillos [1], Álvaro Sánchez-Medina [3], M. Ángeles Grande-Ortíz [2], Concepción González-García [2] and Esperanza Ayuga-Téllez [3,*]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. de las Moreras s/n., 28040 Madrid, Spain; claudia.gventura@upm.es; natividad.buceta@upm.es

[2] Buildings, Infrastructures and Projects for Rural and Environmental Engineering (BIPREE), Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria s/n., 28040 Madrid, Spain; alvaro.sanchezdemedina@upm.es; esperanza.ayuga@upm.es

[3] GEOSO2. Grupo de Investigación Geoespacial y Dinámicas Territoriales para la Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria s/n., 28040 Madrid, Spain; concepcion.gonzalez@upm.es; m.angeles.grande@upm.es;

* Correspondence: esperanza.ayuga@upm.es

Abstract: El arbolado de las ciudades es un elemento clave para el bienestar de las personas y el ecosistema urbano. El objetivo del presente trabajo es comparar los resultados de métodos de valoración de arbolado urbano utilizados históricamente en el mundo. Se han analizado 7 métodos de valoración de arbolado urbano muy utilizados. Se han obtenido valoraciones de ejemplares de 5 especies distintas y de un grupo de árboles singulares situados en el arboreto de la Escuela de Ingenieros de Montes de Madrid. Se obtuvieron datos de diámetro, altura, superficie de copa y edad de los ejemplares. Se analizaron las relaciones lineales entre dichas variables y los diferentes métodos de valoración, así como las relaciones entre los métodos de valoración entre sí. Se emplearon coeficientes de correlación y test estadísticos para determinar la semejanza de métodos. Los métodos de Norma Granada (2004), Capitalización, CTLA y Contato son similares entre sí y están más correlacionados con el diámetro y la edad. Burnley y COPIMA también están muy correlacionados entre sí y tienen correlaciones bajas con las variables dasométricas. Por último, el método FEM difiere del resto y tiene buena correlación con la altura del árbol y la superficie de copa.

Keywords: valor económico del arbolado, modelos de regresión, servicios ecosistémicos

1. Introducción

Los árboles urbanos generalmente se consideran un activo público y son una parte importante del patrimonio de una ciudad. El 56% de la población mundial actualmente vive en las ciudades, y en España en 2020, el 80,5% de la población era urbana, una cifra que se espera que aumente para 2050 [1]. Los estudios sobre el

ecosistema urbano despertarán un creciente interés en los próximos años y, en teoría, deberían ayudar a las personas e instituciones a reconocer el valor de la naturaleza e impulsar significativamente la inversión en la conservación, al tiempo que mejora el bienestar humano [2]. Por lo tanto, la gestión pública de los espacios verdes está ganando mayor importancia para el medio ambiente, la economía y para la sociedad en su conjunto, y la necesidad de determinar los activos es generada por las reclamaciones por daños y procedimientos legales. La falta de una evaluación pública del valor de los árboles es una de las principales causas de su deterioro y dificulta su incorporación en áreas de gestión municipal y planificación territorial [3]. La importancia de los servicios proporcionados por los árboles en entornos urbanos y el papel clave que desempeñan en la vida de los habitantes de la ciudad ha sido la motivación que subyace en investigaciones recientes para cuantificar el valor de la vegetación urbana. Los aspectos menos investigados son los árboles individuales y sus valoraciones económicas [4].

La evaluación monetaria de los activos naturales y los recursos del medio ambiente es un enfoque que contribuye significativamente a la planificación del uso de la tierra y a establecer prioridades para preservar el paisaje natural [5]. Existen numerosas fórmulas de valoración y métodos diseñados específicamente para árboles urbanos, y cada una tiene una aplicabilidad diferente [6]. El mismo árbol tiene un valor económico diferente según el método utilizado. Varios trabajos comparan fórmulas para determinar las diferencias y similitudes entre ellas y descubrir cuáles son las más apropiadas [7-9]. Cada fórmula de valoración también usa diferentes variables dasométricas [3], y es importante establecer si alguna de ellas es redundante o si algunas variables explican una mayor variabilidad que otras [10].

El objetivo de este trabajo es comparar el valor monetario de un árbol, calculado por diferentes fórmulas, relacionando los diferentes métodos de valoración entre ellos y con las variables dasométricas más importantes.

2. Materials and Methods

El lugar donde se sitúa este estudio fue el arboreto de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes y del Medio Natural (Madrid, España). El arboreto [11] es un espacio verde que cumple dos requisitos: contribuye a la infraestructura verde de la Ciudad Universitaria y muestra a los estudiantes las especies forestales de interés (Fig. 1). Este espacio presenta una alta diversidad, con más de 3000 individuos y 400 especies arbóreas inventariadas.

Figura 1. Panorámica de una sección del Arboreto.

Se seleccionaron 42 ejemplares arbóreos del arboreto de la Escuela (Tabla 1), siete ejemplares de cada una de 5 especies representativas del arbolado del arboreto y siete ejemplares de especies diferentes que se seleccionaron por su singularidad.

Tabla 1. Especies seleccionadas.

Especies	**Nombre de grupo**	**Número de individuos**
Cupressus arizonica Greene	Cipres	7
Pinus pinea L.	Pino piñonero	7
Platanus × *hybrida* Brot.	Plátano	7
Quercus suber L.	Alcornoque	7
Ailanthus altissima (Mill.) Swingle	Ailanto	7
Cedrus deodara (Roxb.) G.Don	Singulares	1
Pinus halepensis Mill.	Singulares	1
Chamaerops humilis L.	Singulares	1
Eucalyptus globulus Labill.	Singulares	1
Populus alba var. bolleana (Lauche) et Otto	Singulares	1
Quercus canariensis Willd.	Singulares	1
Sequoiadendron giganteum (Lindl.) J.Buchholz	Singulares	1

En los 42 ejemplares se midieron las variables dasométricas siguientes [12]:

Diámetro a la altura del pecho: DAP (cm). Se mide en el tronco, con corteza, a una altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo. A partir de esta medición, se obtuvo el perímetro (p) del tronco como una circunferencia.

Altura: H (m). Distancia entre la base del tronco y el extremo superior de la copa, medida sobre su eje.

Área de la copa aproximada: SC (m²). Considerando el ancho de la copa y su proyección sobre la superficie del suelo en m², se tomaron dos medidas: la más larga y su perpendicular El área de la copa se estimó como el área romboidal formada por las dos mediciones.

Edad: T (años). Calculada mediante la ecuación de regresión lineal basada en datos de la silvicultura urbana de Santiago del Estero [13].

$$T = 0{,}701774\ p + 0{,}368309\ H - 0{,}0295051\ SC, \quad (1)$$

Se calculó su valor en euros según siete métodos de valoración empleados en diferentes partes del mundo. Todos los valores los calculó la misma persona para evitar diferencias en la tasación por la subjetividad de los métodos [14], con una formación de Máster en Ingeniería de Montes.

Los métodos se describen en [15] y se clasifican en tres tipos según su formulación: paramétrico, mixto y de capitalización [6].

Métodos mixtos, que utilizan valores base que multiplican las medidas del tamaño del árbol por valores unitarios calculados mediante fórmulas de capitalización, y también utilizan índices correctivos:

- Método Contato empleado en Argentina (CONTATO). Utiliza el área de la copa.
- Norma Granada de 2004, método español (N.G.). Este método utiliza la medida de la circunferencia del tronco (a 1 m del suelo).
- Métodos paramétricos que utilizan un valor base e índices correctivos:
- Método de la fórmula de expertos, empleado en Asia (FEM). El valor base se deriva del precio promedio de venta por metro cuadrado de una vivienda de tamaño mediano durante tres años.
- Método norteamericano (CTLA). Define el valor base como una expresión del precio unitario de vivero según la sección del tronco;
- Método Copima empleado en Sudamérica (COPIMA). Se basa en el precio de la especie en el mercado local.
- Método Burnley, utilizado en Australia (BURNLEY). La variable principal es el tamaño del árbol, medido como el volumen de un cono invertido, considerando la altura y el área de copa;

Métodos de capitalización (CAPITAL). Se basan en la capitalización de los costos de reemplazo y mantenimiento a lo largo de la vida del árbol.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo, empleando para el resumen de datos los valores de la media, mediana, desviación estándar (SD), Rango intercuartílico

(RIQ) y coeficiente de variación (CV). Para obtener la relación entre métodos, variables y métodos con variables se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Para detectar igualdad de medias se empleó el test de razón F, mediante el análisis ANOVA, robusto frente a la falta de Normalidad y se utilizó el test de comparaciones múltiples de Tukey a posteriori [16]. En todos los test se empleó un nivel de confianza del 95%. Se utilizó para los cálculos y figuras el software estadístico Excel y Statgraphics 19 - X64.

3. Resultados

En la tabla 2 se muestra el resumen estadístico de las variables medidas en el árbol y de sus valores económicos obtenidos con los siete métodos de valoración.

Tabla 2. Resumen descriptivo de las variables dasométricas y de los valores en euros de los diferentes métodos de valoración y de los diferentes grupos.

Variable	Media	Mediana	SD	RIQ	CV (%)
DAP (cm)	33,04	24,85	22,36	29,20	0,68
H (m)	11,87	10,75	5,37	6,00	0,45
SC (m2)	29,94	18,40	29,93	30,83	1,00
T (años)	77,55	58,50	51,51	66,00	0,66
CONTATO (€)	11524,20	2071,00	33436,60	4226,00	2,90
N.G. (€)	5890,50	1825,00	10388,50	6691,00	1,76
FEM (€)	73391,40	72119,00	15961,40	17925,00	0,22
CTLA (€)	739,57	193,50	1309,90	392,00	1,77
COPIMA (€)	5160,05	1964,00	7656,06	3840,00	1,48
BURNLEY (€)	2887,76	401,50	9690,35	1313,00	3,36
CAPITAL (€)	9279,81	3529,50	17722,60	9001,00	1,91
Ailanthus altissima (€)	11042,7	966	25064,3	2115	226,98
Cupressus arizonica (€)	10203,9	1052	21310,9	2932	208,85
Pinus pinea (€)	13227,4	3080	24582,2	9973	185,84
Platanus hybrida (€)	13297,9	793	30254,3	1594	227,51
Quercus suber (€)	15168,7	4464	21940,1	15044	144,64
Singular (€)	30379,4	8757	42196,3	40590	138,90

Los valores de la mediana para las variables dasométricas son inferiores a los valores medios, lo que indica que existen valores extremos por encima del conjunto de datos. El método FEM es el que tiene valores de la media y mediana más similares y un menor coeficiente de variación. El método FEM proporciona valores medios 100 veces superiores al método CTLA. COPIMA y N.G. son los que proporcionan valores medios más similares. En general, la variabilidad de los valores económicos dados para el conjunto de árboles considerados es pequeña (CV inferior al 5%). El método BURNLEY es el de mayor variabilidad (CV más alto). Para especies, los

valores medios son similares, mientras que el grupo de árboles singulares tiene mayor valor medio. Las medianas presentan mayor diferencia entre ellas, la mediana del grupo de árboles singulares es casi 10 veces mayor que la de *Platanus hybrida.* Los coeficientes de variación están en torno al 200%.

En la figura 2 se muestran las correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas y los métodos de valoración.

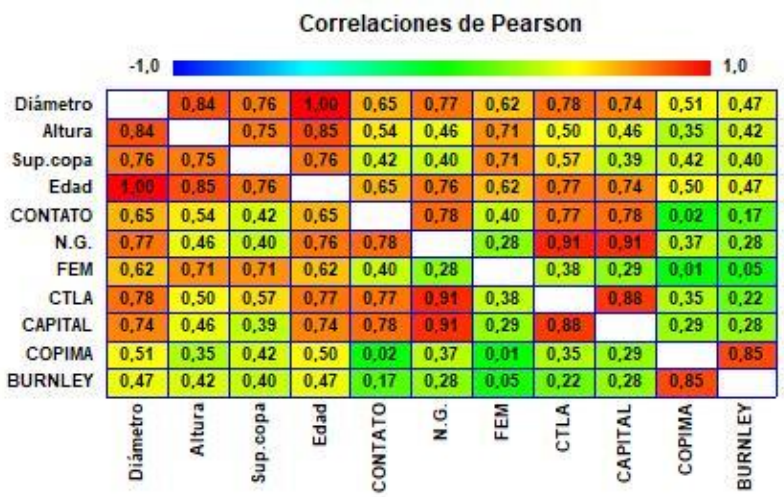


Figura 2. Gráfico de correlaciones de Pearson (r). Los valores en verde muestran correlaciones débiles (p-valor <0,01; p-valor <0,05; p-valor <0,1), en amarillo están las correlaciones moderadas y en naranja y rojo son valores fuertes de correlación.

Los valores son todos positivos, lo que indica que todas las variables tienen relación lineal directa. Las variables dasométricas están bien correlacionadas entre ellas (r >0,7). La edad y el diámetro muestran una correlación muy fuerte, ya que la edad se estimó a partir del resto de variables dasométricas, con un peso mayor del diámetro en la estimación.

A continuación, se evalúan los valores obtenidos en euros y si hay diferencia de medias entre especies, métodos y la interacción de ambos factores.

Table 3. Análisis de varianza para la variable Valor económico. Todas las razones F se basan en el cuadrado medio del error residual.

Fuente de Variabilidad	Factor	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Efectos principales	A:Especie	$1{,}36915 \cdot 10^{10}$	5	$2{,}7383 \cdot 10^{10}$	13,28	0,0000
	B:Método	$1{,}67248 \cdot 10^{11}$	6	$2{,}78746 \cdot 10^{10}$	135,16	0,0000
Interacciones	AB	$1{,}42478 \cdot 10^{10}$	30	$4{,}74925 \cdot 10^{8}$	2,30	0,0003
Residuos		$5{,}19707 \cdot 10^{10}$	252	$2{,}06233 \cdot 10^{8}$		
TOTAL		$2{,}47158 \cdot 10^{11}$	293			

Como los p-valores son inferiores a 0,05 se puede rechazar la igualdad de medias entre especies, métodos e interacciones.

El test de Tukey muestra una diferencia significativa para el grupo de árboles singulares, frente al resto de especies que se pueden considerar con valores homogéneos (Figura 3).

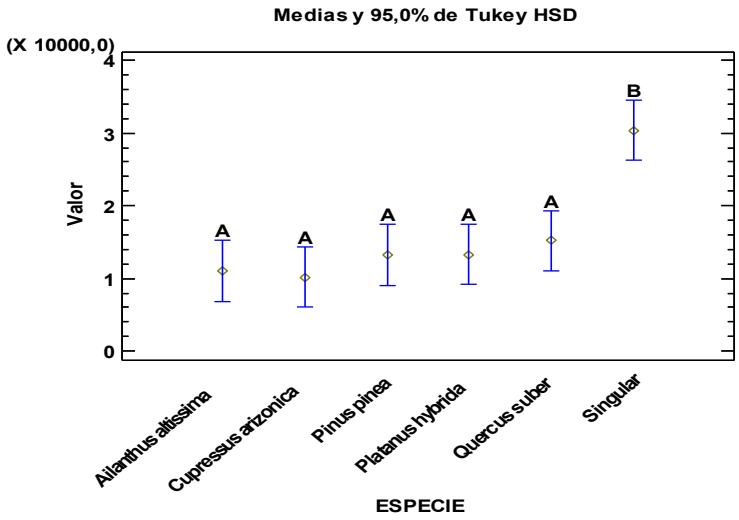


Figura 3. Gráfico de valores medios. Los valores con la misma letra muestran homogeneidad con el test de Tukey. Los intervalos del gráfico corresponden al cálculo del 95% de confianza para el test HSD (honestly-significant-difference) de Tukey, con un valor en este caso de 8882,5 €.

La figura 4, muestra la diferencia de medias para los métodos de valoración empleados.

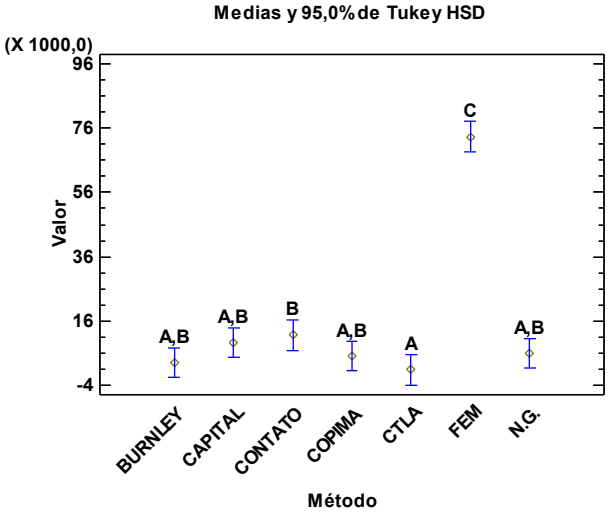


Figura 4. Gráfico de valores medios para los diferentes métodos. Los valores con la misma letra muestran homogeneidad con el test de Tukey Los intervalos del gráfico corresponden al cálculo del 95% de confianza para el test HSD (honestly-significant-difference) de Tukey, con un valor en este caso de 9929,97 €.

La figura 4, muestra una diferencia notable para el método FEM con el resto y diferencias menores entre CONTATO y CTLA. Los métodos de BURNLEY, COPIMA y N.G. son muy similares, mientras que CAPITAL se asemeja mucho a CONTATO y el CTLA a BURNLEY.

Por último, en la figura 5 se muestran las interacciones entre ambos factores. FEM, CONTATO y CAPITAL son los que muestran valores con mayor interacción con el grupo de singulares, *Quercus suber* y *Pinus pinea*.

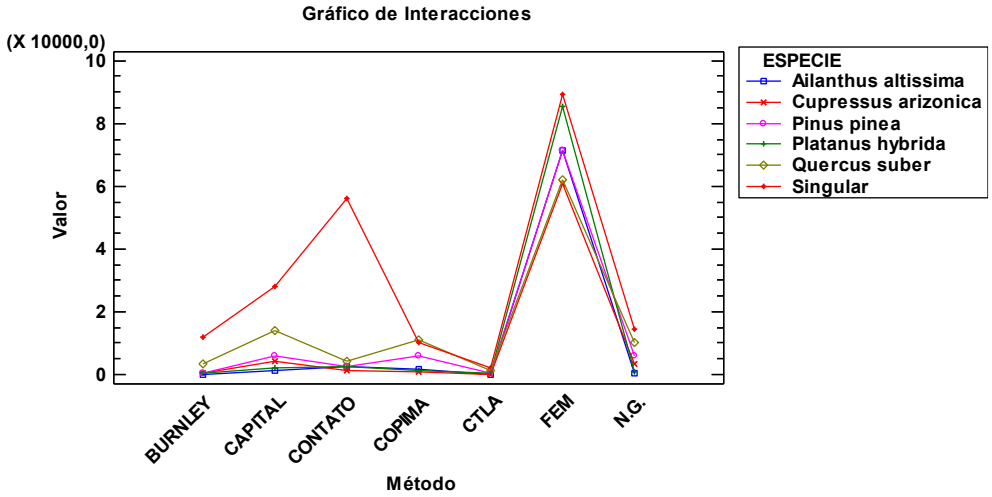


Figura 5. Gráfico de valores medios para la interacción del método con el grupo de especies o árboles singulares.

Los modelos de regresión lineal que pueden obtenerse con variable independiente la variable dasométrica y con variable dependiente el valor monetario con cada método de valoración puede verse en la figura 6, para el caso de la superficie de copa (SC). El resto de los modelos son similares al mostrado.

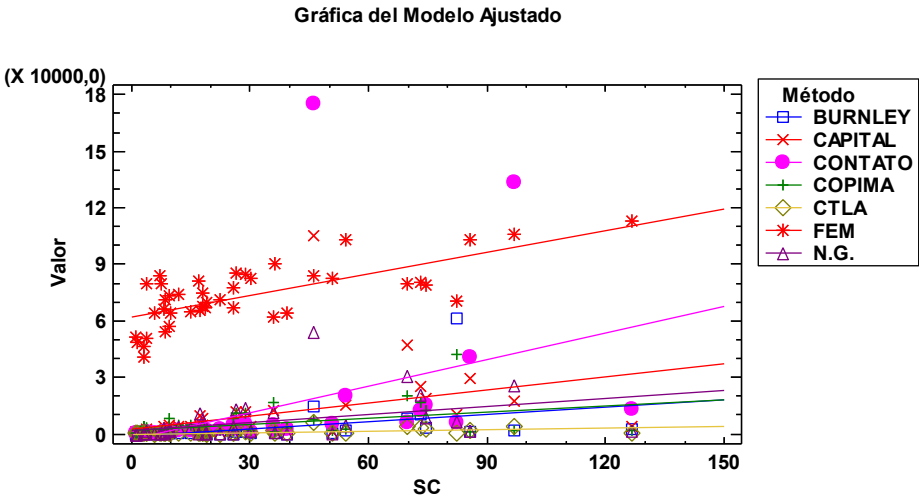


Figura 6. Gráfico de valores medios para la interacción del método con el grupo de especies o árboles singulares para la variable dasométrica superficie de copa (SC).

Con pequeños valores de la variable dasométrica, el método FEM ya da un valor económico alto a los árboles. El método CONTATO tiene una mayor pendiente, aumenta más el valor cuanto mayor es el tamaño del árbol, aunque presenta dos valores atípicos importantes, correspondientes a los árboles singulares *Pinus halepensis* y *Sequoiadendron giganteum*, con valores más altos que los que corresponden a su superficie de copa. El método que proporciona menores incremento de valor a mayor tamaño del árbol es el CTLA.

En la tabla 4 se muestran los valores de las pendientes de las líneas de regresión obtenidas con cada método y para cada variable.

Tabla 4. Valores de la pendiente de la recta para los modelos de regresión de cada variable con cada método.

Método	DAP	H	SC	T
CONTATO	969,36	3.389,79	469,82	420,82
N.G.	356,63	893,04	140,19	153,84
FEM	440,48	2.121,91	380,35	192,20
CTLA	45,46	122,74	24,93	19,58
COPIMA	173,43	500,48	106,25	74,86
BURNLEY	201,65	762,54	128,54	87,69
CAPITAL	588,10	1.530,83	230,97	253,94

Con la superficie de copa se obtienen las mayores pendientes de las rectas para todos los métodos. A su vez, el método CONTATO es el que ofrece mayores pendientes para todas las variables. La mayor pendiente corresponde al método CONTATO con SC y la siguiente al método FEM con SC. El CTLA es el que proporciona pendientes más bajas para todas las variables. La pendiente más baja corresponde a la edad con CTLA.

4. Discusión

Las fórmulas de valoración de arbolado urbano tienen diferentes niveles de validez y aceptación, incluso dentro de los países que las proponen. Con frecuencia, están formuladas por expertos locales, con variables de uso generalizado en su territorio y con factores o parámetros importantes para las características propias de su zona. La mayoría de los métodos se estudian y aplican en el mundo occidental [14]. Pocas

veces se comparan métodos de valoración de la cultura oriental, como es el FEM, con otros [6].

Los métodos empleados en este trabajo emplean valores básicos basados en la edad (COPIMA y CAPITAL,) el tamaño del tronco (N.G., CTLA y FEM), la superficie de copa (CONTATO), o en el tamaño integral del árbol (BURNLEY). Para obtener el valor se multiplican por valores unitarios monetarios basados en precios de mercado, como FEM (valor del suelo), y el resto con precios de vivero. Salvo el método de capitalización, todos emplean parámetros que debe evaluar un tasador. Con mucha frecuencia las fórmulas emplean variables o parámetros que requieren una elección del experto, que no siempre coincide con la de otro tasador [14].

En los ejemplares analizados, todas las variables están bien relacionadas ($r \geq 0,75$). La que tiene una menor correlación con el resto de las variables dasométricas es la superficie de copa. La superficie horizontal de copa está muy relacionada con la cobertura arbórea. Actualmente, la cobertura arbórea es una medida del verde urbano, objeto de legislación internacional. (próximamente la Unión Europea fijará un mínimo de cobertura arbórea en las ciudades del 10%) [17,18]. La superficie de copa presenta en los ejemplares analizados una mayor variabilidad que el resto de las variables dasométricas (CV del 1%) por lo que puede ser una mejor variable para usar en los métodos de valoración. Esto es compatible con los resultados obtenidos en [10].

En cuanto a los métodos Los métodos de Norma Granada (2004), Capitalización, CTLA y Contato son similares entre sí y están más correlacionados con el diámetro y la edad. Burnley y COPIMA también están muy correlacionados entre sí y tienen correlaciones bajas con las variables dasométricas. Por último, el método FEM difiere del resto y tiene buena correlación con la altura del árbol y la superficie de copa.

Desde el punto de vista del incremento del valor con el aumento del tamaño del árbol, los mejores valores se observan para la superficie de copa y para los métodos CONTATO y FEM. Los métodos CTLA y N.G., a pesar de estar recomendados en [14] no presentan buena relación con el tamaño del árbol.

Para poder generalizar estos resultados se necesitaría mayor número de ejemplares y especies, con más métodos que se empleen en ciudades de climas y culturas diferentes. Recientemente se ha actualizado la N.G. y debería realizarse un estudio similar empleando la actualización, aunque en ella no se ha modificado la variable dasométrica para calcular el valor básico, sí muestra valores claramente diferentes en monto económico y en correlación con el tamaño del árbol [19]

5. Conclusiones

La superficie de copa es la variable que más discrimina los ejemplares del arbolado urbano ya que muestra una mayor variabilidad.

De los métodos analizados CONTATO y FEM son los que mejor relacionan el valor del arbolado con el tamaño del árbol. El método CTLA, pese a ser uno de los más usados, es el que menos variación muestra, dependiendo del tamaño.

Author Contributions: For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used "Conceptualization, E.A-T.; methodology, E.A-T; C.G-V. and C.G-G.; formal analysis, C.G-G.; A.S. and MA.G-O.; investigation, C.G-V. and N. B; writing—original draft preparation, C.G-V.; writing—review and editing, N.B.; supervision, A.S. and MA.G-O. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.".

Funding: Please add: "This research received no external funding"

Institutional Review Board Statement: "Not applicable."

Conflicts of Interest: "The authors declare no conflict of interest."

References

1. Restrepo Betancur L. F. Crecimiento poblacional urbano a nivel mundial en las últimas seis décadas. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, **2024**, 44(1), 277-295. https://doi.org/10.5209/aguc.94213
2. Daily, G. C.; Polasky, S.; Goldstein, J.; Kareiva, P. M.; Mooney, H. A.; Pejchar, L.; Ricketts, T. H.; Salzman, J.; Shallenberger, R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment,* **2009**, *7(1)*, 21-28.
3. Ayuga-Téllez, E; Contato-Carol, M.L.; García-Ventura, C.; Sánchez-Medina, A.; Grande-Ortiz, M.A.; González-García, C. Obtención de valores unitarios mediante el método de árboles-tipo para la tasación del arbolado urbano: aplicación en Santiago del Estero (Argentina) y Madrid (España). *Bosqu,e* **2016**, *37(1)*, 53-62.
4. Nesbitt, L.; Hotte, N.; Barron, S.; Cowan, J.; Sheppard, S. R. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: A review and suggestions for future research. *Urban Forestry & Urban Greening,* **2017**, *25*, 103-111.
5. Mieko Viana, S.; Leite Tosetti, L.; Cavalcante Pereira, L.; Ferreira da Silva, D. Monetary valuation: research on urban forests. *Journal of Brazilian Society of Urban Forest,* **2012**, *7(1),* 46-52.
6. Grande-Ortiz, M.A.; Ayuga-Téllez, E; Contato-Carol, M.L. Methods of tree appraisal: a review of their features and application possibilities. *Arboriculture and Urban Forestry,* **2012**, *38 (4)*, 130-140.
7. Watson, G. Comparing formula methods of tree appraisal. *J. Arboric.* **2002**, *28*, 11–18.
8. Hegedüs, A.; Gaál, M.; Bérces, R. Tree appraisal methods and their application. First results in one of Budapest's districts. *Appl. Ecol. Environ. Res*. **2011**, *9*, 411–423
9. Alonso, M.; Ponce-Donoso, M.; Morales, C.; Vallejos-Barra, O.; Jolochin, G. Evaluación de la fórmula que determina el valor monetario del arbolado urbano en Montevideo, Uruguay. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, **2019**, *27(1)*, 13-25.
10. Sánchez-Medina, A.; Ayuga-Téllez, E; Contato-Carol, M.L.; Grande-Ortiz, M.A.; González-García, C. Selection of dasometric variables used in appraisal methods of urban trees according to its collinearity. *Arboriculture and Urban Forestry*, **2017**, *43 (3)*, 122-131.
11. López-Rodriguez, A., López-Leiva, C. "Arboreto 360", learning through the immersing experience of the 360º virtual tour of the arboretum of the School of Forest Engineering and natural resources, Technical University of Madrid. In ICERI2023 Proceedings of the 16th annual

International Conference of Education, Research and Innovation, Seville, Spain, 13-15 November, 2023, (pp. 6851-6855). IATED.

12. García-Ventura, C.; Ayuga-Téllez, E.; Grande-Ortíz, M.; Sánchez-Medina, Á.; Comparison of three valuation methods for three tree species at the Arboretum of the Forestry Engineers School (Madrid). In AgEng 2014. Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, Switzerland, 06-10 July, 2014
13. Ayuga-Téllez, E.; Contato-Carol, M. L.; Grande-Ortiz, MªA.; González-García, C. Análisis multivariante para seleccionar las variables apropiadas para describir y valorar el arbolado urbano. Aplicación a Santiago del Estero (Argentina). Resúmenes en Actas del IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, España. 2007,232-234.
14. Ponce-Donoso, M., Vallejos-Barra, Ó., & Escobedo, F. J. (2017). Appraisal of urban trees using twelve valuation formulas and two appraiser groups. Arboriculture & Urban Forestry (AUF), 43(2), 72-82
15. García-Ventura, C.; Sánchez-Medina, Á.; Grande-Ortíz, M.; González-García, C.; Ayuga-Téllez, E. Comparison of the Economic Value of Urban Trees through Surveys with Photographs in Two Seasons. *Forests,* **2018***, 9(3)*, 132.
16. Cardoso, G. C., & Veitía, N. (2008). Aplicación de métodos de comparaciones múltiples en Biotecnología Vegetal. Biotecnología vegetal, 8(2).
17. Rahman, M. A., Arndt, S., Bravo, F., Cheung, P. K., van Doorn, N., Franceschi, E., ... & Torquato, P. R. More than a canopy cover metric: Influence of canopy quality, water-use strategies and site climate on urban forest cooling potential. *Landscape and Urban Planning*, **2024**, 248, 105089,
18. Martinez, R. M., Soonsawad, N., Baptista, M. D., Cook, S., Barnett, G., Chee, J., ... & Muster, T. Challenges and strategies in meeting urban tree canopy targets: A scenario discovery analysis to guide urban forest planning in new developments. Trees, Forests and People, **2025**, 100787.
19. Ayuga-García, A.I.; Ayuga-Téllez, E. Impacto económico de Filomena en algunos ejemplares de dos especies de zonas verdes y viario de Madrid. Norma Granada In Actas del 47 Congreso de Parques y Jardines Públicos PARJAP. E. Ayuga-Téllez, A. Ugidos (Eds.) Asociación Española de Parques y Jardines Públicos, Murcia, España, 2021, pp. 8-17.

Acompañamiento a productores de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrecasas) en Buchadó, Chocó biogegráfico, Colombia.

Jhon W. Mejía-Montoya[1*], Carlos J. Márquez-Cardozo1, Héctor J. Ciro-Velásquez1, Cristian Cano Correa[2], Víctor A. Madrid Sánchez[2], Paula A. Zuluaga Ortega[2], María A. Monsalve Vásquez[3], Isabela Coronado Magalhães[3].

[1] Profesor Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias

[2] Estudiante Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias

[3] Egresadas Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias

* Correspondencia: jwmejia@unal.edu.co Director del proyecto de Extensión Solidaria

Resumen: La comunidad de Buchadó a orillas del río Atrato, deriva su sustento de actividades primarias de la economía: agricultura, pesca y explotación forestal, este proyecto busca contribuir al mejoramiento de su sistema de producción, transformación y comercialización de borojó. Con metodología de investigación-acción participativa, se caracterizó el sistema de producción; se evaluaron sistemas de poscosecha de fruta fresca; se estandarizó el proceso de producción de pulpa y mermelada; se diseñó del proceso y planta arquitectónica de poscosecha. La producción de borojó en Buchadó se caracteriza por tener arreglo agroforestal aleatorio, bajo uso de agroinsumos y baja productividad. El empaque de polietileno con poliamida conservó mejor la fruta comparado con el tradicional de sólo polietileno. Se caracterizó la fruta fresca de borojó y estandarizó las formulaciones de pulpa y mermelada. Se diseñó el proceso de poscosecha y la planta arquitectónica con integración de la norma sanitaria, a las dimensiones natural y social. El proyecto, permitió la formalización de la Asociación de Agricultores de Buchadó – ASOAGRIBÚ. Se recomienda implementar una planta de poscosecha con registro sanitario, y un campo escuela de frutales del Chocó Biogeográfico, a fin de mejorar el nivel de vida y la permanencia de las comunidades en su territorio.

Palabras clave: Atrato medio, borojó, enfoque territorial, mermelada, poscosecha del borojó, valor agregado.

1. Introducción

La situación de vulnerabilidad y pobreza multidimensional de las comunidades afrodescendientes en la cuenca del río Atrato en Colombia, resulta de una dinámica multifactorial de años de conflicto, responsable de condiciones de vivienda y salud

precarias, informalidad laboral e inseguridad alimentaria. El 76.1% de la población de Vigía del Fuerte vive en condiciones de pobreza multidimensional [1]. Al corregimiento de Buchadó es un territorio selvático cenagoso, al que solo se accede por vías fluviales, sus habitantes, derivan su sustento de la agricultura, la pesca de subsistencia y la explotación forestal [2]. El borojó es un frutal arbustivo del Chocó, en especial de la región central surcada por el río Atrato y sus afluentes, con condiciones agroecológicas de altas precipitación, temperatura media, humedad relativa y sombrío, propias de la vegetación semiboscosa [3, 4]. En el año 2020, el área sembrada con borojó en Colombia fue 2,800 has, la productividad promedio nacional fue de 6.45 ton/ha, aunque se pueden alcanzar 12 ton/ha [5].

La adaptación del borojó a las condiciones agroecológicas del Chocó Biogeográfico, especialmente su tolerancia a ciclos anuales de inundación y estiaje del Río Atrato, y las posibilidades de transformación agroindustrial, constituye una oportunidad de desarrollo rural sostenible alineada con los deseos de la comunidad, el Plan de Desarrollo del Departamento del Chocó 2024-2027 [6], y el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 [7]. La comunidad de Buchadó, ha expresado su interés en mejorar las formas de producción, transformación y comercialización del borojó, y el deseo de trabajo asociativos. Este proyecto tiene por objetivo contribuir al mejoramiento de los sistemas de producción, transformación y comercialización de borojó de los agricultores de Buchadó, a fin de mejorar la productividad de sus cultivos, y avanzar en la escala de valor de sus cosechas.

2. Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló con enfoque de investigación acción participativa IAP [8], desarrollo rural territorial [9, 10, 11] y aprender haciendo [12]. Se buscó la participación activa de la comunidad de beneficiarios mediante conversatorios, observación, toma de datos, entrevistas grupales e individuales semiestructuradas, y trabajo colaborativo en cosecha, procesamiento y transformación de la fruta. Se realizaron las siguientes actividades:

2.1 Caracterización del sistema de producción de producción de borojó, se siguió el enfoque de agroecosistemas [13], en 23 predios productores de borojó se analizarán sus componentes, interacciones entre componentes; límites (tamaño); entradas y salidas, a partir de la siguiente información: polígono de producción, caracterización edafológica de cada predio mediante análisis de calicata de 1 m x 1 m x 1 m, caracterización espacial y temporal del sistema de producción, prácticas de manejo agronómico, productividad (kg de borojó/ha/año), información climatológica disponible en la zona de influencia, caracterización socioeconómica y demográfica de los productores

2.2 Evaluación de sistemas de poscosecha para fruta fresca: se evaluaron 12 tratamientos resultantes de la combinación de tres factores principales de poscosecha: Tipo de empaque (polietileno de baja densidad; estructura de polietileno con poliamida). Lavado - secado - desinfección de la fruta (sin lavado ni desinfección; aspersión y secado; inmersión y secado). Temperatura de almacenamiento (con refrigeración a 5 °C, sin refrigeración 23 °C - 28 °C). Los tratamientos fueron evaluados bajo un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos. La unidad experimental correspondió a una fruta, se tuvieron cinco repeticiones por tratamiento, se hicieron evaluaciones semanales no destructivas: pérdida de peso (g), presencia y crecimiento de hongos. Al día 32 después de la cosecha, expectativa de almacenamiento de la fruta, se realizó una prueba de aceptación general por parte de consumidores mediante la calificación de atributos color, olor y textura, en una escala de aceptación general de 1 a 5, en gradiente creciente de aceptación, con el promedio homoponderado de los tres parámetros se obtuvo el índice de aceptación general.

2.3 Estandarización de los procesos de producción de pulpa y mermelada de borojó. A partir de experiencias previas con otras frutas tropicales, se formuló el proceso de producción de pulpa de borojó con la combinación de técnicas de conservación físico-químicas (calor y conservante benzoato de sodio) que no requieran cadena de frío para su conservación, toda vez que se trata de un territorio selvático no interconectado al sistema eléctrico nacional. en el caso de la mermelada se formuló un producto que se ajusta a la definición del producto y requisitos de composición del Codex Alimentarius [14]. Así mismo, que cumpla con las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana 285, que establece las especificaciones para mermeladas, jaleas y similares [15].

2.4 Diseño del proceso y planta arquitectónica de poscosecha de borojó: se diseñó el proceso de producción de la planta de poscosecha con enfoque de “cero residuos” de tres líneas: fruta fresca seleccionada, desinfectada y empacada, producto transformado (pulpa y mermelada de borojó) y manejo de los subproductos (fruta de descarte, cáscara y semillas). Se diseñó una planta de poscosecha que combina las dimensiones social y natural de la arquitectura, y de cumplimiento a la Resolución 2674 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia [16], que regula los requisitos sanitarios para la fabricación, procesamiento, almacenamiento, transporte y comercialización de alimentos en el país, y establece requisitos arquitectónicos orientados a la inocuidad (diseño y construcción, materiales, separación de áreas, ventilación, iluminación y drenajes).

3. Resultados

3.1 Características del sistema de producción de borojó

El sistema de producción de borojó en Buchadó se caracteriza por pequeñas parcelas (menos de 1 ha), a orillas del río Atrato y sus tributarios, en condiciones de bosque húmedo tropical con precipitación media anual de 4918 mm, suelos de textura franca, con bajo contenido de materia orgánica y potasio, alto contenido de calcio y magnesio, y niveles medios de fósforo (Tabla 1). Con arreglo espacial aleatorio, en asocio con especies forestales (Figura 1) entre las que se destacan guácimo colorado (*Luehea seemannii)*, árbol del pan (*Artocarpus altilis),* jagua (*Genipa americana*), roble (*Quercus robur)* y cedro (*Cedrela odorata)*. Con bajo uso de agroinsumos y baja productividad. el material de siembra corresponde a semilla sexual sin selección previa de los parentales.

Tabla 1. Resultados del análisis de propiedades físico-químicas de tres muestras de suelos de predios productores de borojó a orillas del río Atrato – Colombia

Muestra	Textura				pH	MO	CO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P
	A%	L%	Ar%	Clase		%		cmol c / kg					mg/Kg
1	30	46	24	F	5.7	2.33	1.35	N.A.	7.71	3.13	0.10	10.94	14.87
2	22	46	32	Far	5.5	3.02	1.75	N.A.	6.72	3.11	0.09	9.92	12-04
3	28	46	46	F	5.3	3.12	1.81	0.80	5.49	2.19	0.07	0.07	12.76

Figura 1. Características del arreglo especial del cultivo de borojó a orillas del río Atrato-Colombia (izquierda) y fruta en madurez comercial (derecha)

3.2 Evaluación de sistemas de manejo de poscosecha de fruta fresca

De acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 2) los factores estructura, temperatura y la interacción estructura-temperatura, tuvieron efecto significativo sobre la variable de respuesta pérdida de peso de la fruta.

Tabla 2. ANAVA para la variable pérdida de peso de la fruta de borojó

	DF	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	
Estructura	1	510.1	510.1	35.117	8.73e-07	***
Temperatura	1	2715.8	2715.8	186.975	7.97e-16	***
Desinfección	2	77.4	38.7	2.664	0.0834	.
Estructura:Temperatura	1	379.1	379.1	26.098	1.08e-05	***
Estructura:Desinfección	2	15.1	7.6	0.520	0.5990	
Temperatura:Desinfección	2	20.2	10.1	0.696	0.5051	
Estructura:Temperatura: Desinfección	2	6.3	3.2	0.218	0.8051	
Residuales	36	522.9	14.5			

Código de significancia: 0 “***” 0.001 “**” 0.01 “*” 0.05 “.”

De acuerdo con la prueba Tukey de comparación de medias (Tabla 3), en la estructura polietileno con poliamida (PoPa) se presentó la pérdida de peso, así mismo ocurrió en la temperatura de almacenamiento con refrigeración, la combinación PoPa y refrigeración fue a más conservadora del peso de la fruta.

Tabla 3. Prueba Tukey de comparación de medias entre tratamientos para la variable pérdida de peso de la fruta de borojó

Material de la estructura	Promedio de pérdida de peso	Grupo
Polietileno	11.69375	a
Polietileno-poliamida	5.174167	b

Temperatura de almacenamiento	Promedio de pérdida de peso	Grupo
Ambiente	15.955833	a
Refrigeración	0.9120833	b

Interacciones	Promedio de pérdida de peso	Grupo
Polietileno:Ambiente	22.025833	a
Polietileno-poliamida:mbiente	9.885833	b
Polietileno:Refrigeración	1.361667	c
Polietileno-poliamida:Refrigeración	0.462500	c

De acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 4) los factores estructura, temperatura y la interacción estructura-temperatura, tuvieron efecto significativo sobre la variable de respuesta crecimiento de moho en la superficie de la fruta.

Tabla 4. ANAVA para la variable crecimiento de moho

	DF	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	
Estructura	1	8533	8533	28.055	6.05e-06	***
Temperatura	1	32033	32033	105.315	3.10e-12	***
Desinfección	2	1929	965	3.171	0.0539	.
Estructura:Temperatura	1	9075	9075	29.836	3.64e-06	***
Estructura:Desinfección	2	54	27	0.089	0.9150	
Temperatura:Desinfección	2	2504	1252	4.116	0.245	*
Estructura:Temperatura:Desinfección	2	112	56	0.185	0.8319	
Residuales	36	10950	304			

Código de significancia: 0 “***” 0.001 “**” 0.01 “*” 0.05 “.”

De acuerdo con la prueba Tukey de comparación de medias (Tabla 5), en la estructura polietileno con poliamida (PoPa) se presentó el menor crecimiento de mohos, así mismo ocurrió en la temperatura de almacenamiento con refrigeración, independientemente del tipo de estructura, la refrigeración resulta el factor más protector de mohos.

Tabla 5. Prueba Tukey de comparación de medias entre tratamientos para la variable crecimiento de moho sobre la fruta de borojó

Material de la estructura	Proporción de la superficie de la fruta con moho (%)	Grupo
Polietilieno	47.91677	a
Polietileno-poliamida	21.25000	b

Temperatura de almacenamiento	Proporción de la superficie de la fruta con moho (%)	Grupo
Ambiente	60.41667	a
Refrigeración	8.75000	b

Interacciones	Proporción de la superficie de la fruta con moho (%)	Grupo
Polietileno:Ambiente	87.500000	a
Polietileno-poliamida:mbiente	33.333333	b
Polietileno:Refrigeración	9.166667	c
Polietileno-poliamida:Refrigeración	8.333333	c

En identifican conidias y conidióforos de *Penicillium* spp (Figura 2) a partir del moho que creció sobra la fruta de borojó. Las conidias se presentan en una estructura ramificada y filamentosa, en tanto que los conidióforos, tallos que sostienen las esporas, se extienden en forma vertical formando un denso y difuso racimo, cada uno muestra una apariencia cilíndrica y se ramifica en múltiples estructuras más delgadas, en la cúspide de cada ramificación, se observan los conidios en forma de pequeñas esferas o elipsoides [17].

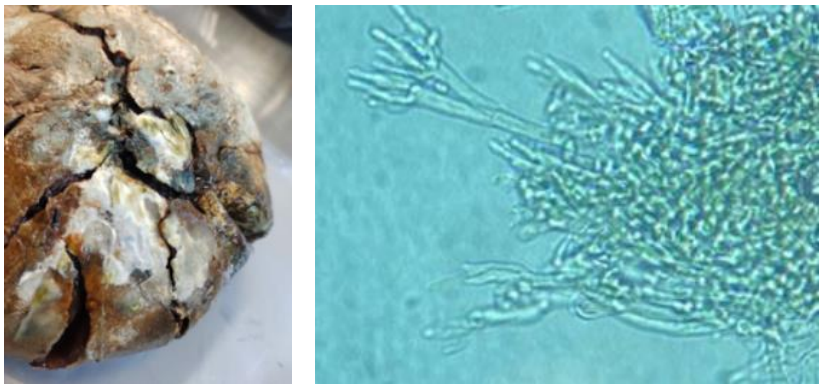


Figura 2. Fruto de borojó infectado por mohos (izquierda), conidióforo y conidias de *Penicillium* spp (derecha)

De acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 6), los factores, estructura y temperatura de almacenamiento, tuvieron efecto sobre la variable de respuesta aceptación general.

Tabla 6. ANAVA para la variable aceptación general

	DF	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	
Estructura	1	3.00	3.00	9.573	0.00381	**
Temperatura	1	81.38	81.38	259.695	< 2e-16	***
Desinfección	2	1.74	0.87	2.779	0.07546	.
Estructura:Temperatura	1	0.79	0.79	2.528	0.12058	
Estructura:Desinfección	2	0.19	0.10	0.309	0.73621	
Temperatura:Desinfección	2	0.17	0.08	0.267	0.76694	
Estructura:Temperatura:Desinfección	2	0.36	0.18	0.582	0.56385	
Residuales	36	11.28	0.31			

Código de significancia: 0 “***” 0.001 “**” 0.01 “*” 0.05 “.”

De acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey (Tabla 7), la estructura de polietileno con poliamida (PoPa), y el almacenamiento refrigerado (Re) tuvieron la mejor aceptación general.

Tabla 7. Prueba de comparación de medias tipo Tukey para la aceptación general de la fruta

Material de la estructura	Aceptación general	Grupo
Polietileno-poliamida	3.111111	a
Polietilieno	2.611111	b

Temperatura de almacenamiento	Aceptación general	Grupo
Refrigeración	4.163194	A
Ambiente	1.559028	B

3.3 Estandarización de los procesos de producción de pulpa y mermelada de borojó

Previa caracterización físico-química de la fruta fresca de borojó (Tablas 8), y evaluación del rendimiento de fracciones de la fruta (Tabla 9) mediante despulpado mecánico (Figura 3), se estandarizó el proceso de producción de pulpa.

Tabla 8. Características físico-químicas del fruto de borojó

Diámetro mayor (cm)	Solidos solubles (°Brix)	pH	Humedad (%)	Actividad de agua (Aw)	Proteína (%)
14.5 ± 2	25 ±2	3.23 ± 0.2	61.5 ± 3	0.90 ± 0.01	0.7 ± 0.2

Tabla 9. Rendimiento de las fracciones de borojó resultantes del proceso de despulpado mecánico

Peso de la fruta (g)	Peso de la cáscara (g) Participación (%)	Peso de la pulpa (g) Participación (%)	Peso de las semillas (g) Participación (%)
558.1 ± 20	37.3 ± 5 6.68 ± 4	347.04 ± 5 71.54 ± 2	121.54 ± 4 21.78 ± 3

Figura 3. Despulpado mecánico de la fruta de borojó

La pulpa de borojó, constituye un producto 100% natural, con textura pastosa, no fermentado, obtenido del proceso de despulpado de la fruta en estado fresco, sana, madura, limpia, desinfectada y seleccionada. El producto es pasteurizado y tiene adición del conservante alimentario benzoato de sodio, sal derivada del ácido benzoico, con capacidad para inhibir el crecimiento de bacterias, levaduras y mohos,

en condiciones ácidas. La Figura 4 ilustra el proceso de producción de pulpa de borojó a partir de fruta fresca.

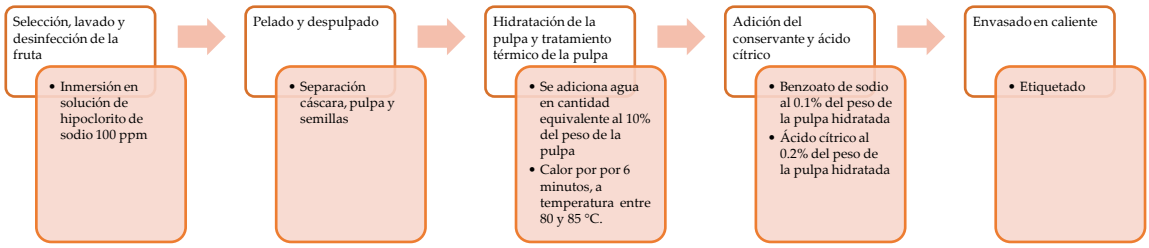


Figura 4. Proceso de obtención de pulpa de borojó

La siguiente es la ficha técnica del producto:

- Nombre del Producto: Pulpa de borojó
- Características del Producto: pH: 3.2. Consistencia: Homogénea y sin partículas extrañas. Color: Marrón claro característico de la fruta. Aroma: Intenso y natural. Sabor: Dulce con ligera acidez
- Ingredientes: Pulpa de borojó hidratada (99%), Benzoato de sodio (0.1%)
- Parámetros de Control de Calidad: pH final: 3.2 (± 0.1). Ausencia de contaminantes y microorganismos. Cumplimiento de normas sanitarias en el proceso.
- Vida Útil: 15 días sin refrigerar. 6 meses en refrigeración (4°C). 12 meses en congelación (-18°C)
- Presentación y Empaque: empaques plásticos con tapa de seguridad de 250 g, 500 g y 1000 g. Etiquetado con información nutricional, ingredientes y fecha de caducidad
- Aplicaciones y consumo: Ideal para la preparación de jugos, batidos y productos derivados. Puede utilizarse en la industria alimentaria para la elaboración de mermeladas, postres y salsas.

La figura 5 muestra el proceso de producción de mermelada de borojó

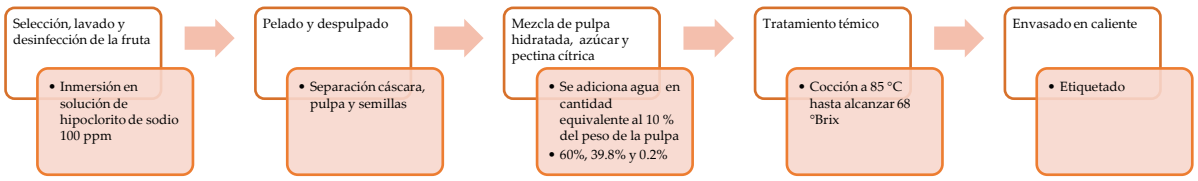


Figura 5. Proceso de obtención de mermelada de borojó

La siguiente es la ficha técnica del producto:

- Nombre del Producto: Mermelada de Borojo

- Características del Producto: pH: 3.2. °Brix: 68. Consistencia: Untable, homogénea y brillante. Color: Marrón característico del borojó. Aroma: Intenso, característico de la fruta. Sabor: Dulce con ligera acidez
- Ingredientes: Pulpa de borojó hidratada (60%), azúcar (39.8%) y pectina (0.2%)
- Parámetros de Control de Calidad: pH final: 3.2 (± 0.1). °Brix: 68 (± 1). Ausencia de contaminantes y microorganismos. Cumplimiento de normas sanitarias en el proceso
- Vida Útil: 12 meses en condiciones óptimas de almacenamiento (temperatura ambiente, lugar seco y sin exposición directa a la luz, siempre y cuando no se destape, una vez realizada esta operación, se deberá consumir en el menor tiempo posible)
- Presentación y Empaque: Frascos de vidrio de 250 g y 500 g. Tapas herméticas para garantizar la conservación. Etiquetado con información nutricional, ingredientes y fecha de caducidad.
- Aplicaciones y consumo: Ideal para acompañar pan, galletas, yogur, postres y otros alimentos. Puede utilizarse en la industria de panificación y repostería.
- Recomendaciones de almacenamiento: Mantener en un lugar fresco y seco.

Diseño del proceso y planta arquitectónica de poscosecha de borojó:

En la figura 6 se ilustra el flujo de operaciones de en la planta de planta de poscosecha de borojó, con producción de fruta fresca, transformada y con manejo de subproductos para obtención de harinas. El diseño arquitectónico se presenta en las figuras 7, 8 y 9.

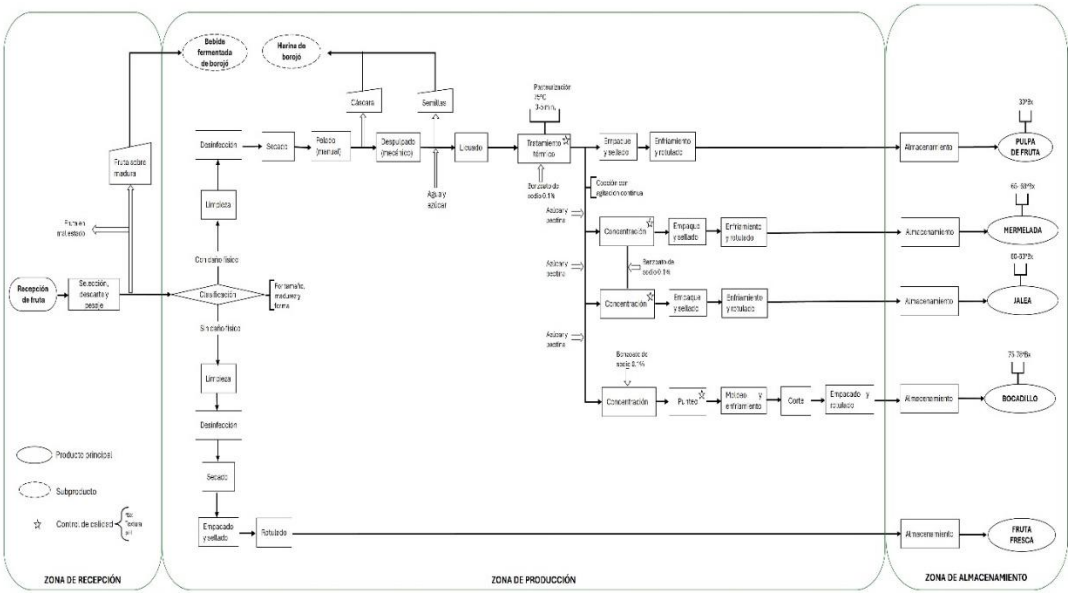


Figura 6. Flujo de operaciones en la planta de poscosecha de borojó

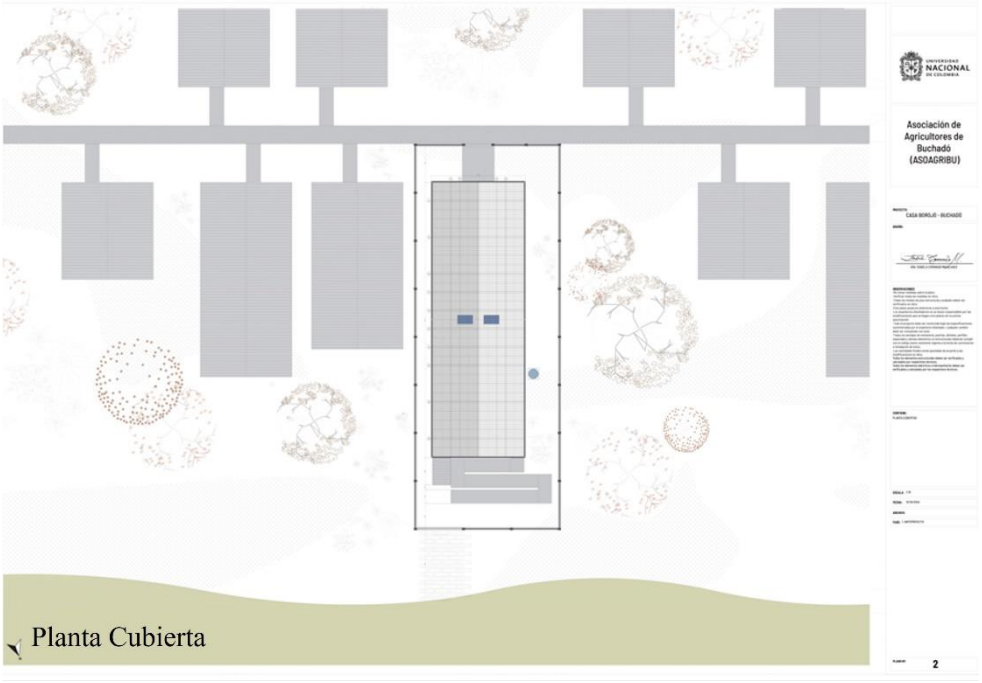


Figura 7. Diseño arquitectónico, planta cubierta

Figura 8. Secciones alzados y representación digital de la planta de poscosecha en sitio

Figura 9. Representación digital de la planta de poscosecha exterior (izquierda), interior (derecha)

4. Discusión

Este proyecto de Extensión Solidaria de la Universidad Nacional de Colombia, surgió de una solicitud de la comunidad de mejorar sus sistemas de producción de borojó. El proyecto ha permitido el intercambio de saberes entre la comunidad local y académica, alrededor del desarrollo multidimensional del territorio: económico, social y ambiental y político organizacional [10]. El Desarrollo Territorial Rural se define como un proceso de transformación productiva e institucional de un espacio rural determinado, cuyo fin es reducir la pobreza rural [9]. La perspectiva territorial del DRS busca formular una propuesta centrada en las personas y afianzada en las interacciones entre sistemas socioculturales y ambientales. Enfatiza en las capacidades locales y las ventajas comparativas de las comunidades [18].

El borojó es un arbusto de la familia Rubiaceae, se trata de una especie dioica, su fruto es una baya globosa de 7 a 12 cm de diámetro, y alrededor de 740 g de peso [4]. Es un frutal arbustivo del Chocó, en especial de la región central surcada por el río Atrato y sus afluentes, con condiciones agroecológicas de alta precipitación (más de 4.000 mm/año), temperatura media de 28 °C, humedad relativa de 85% y condiciones de sombrío propias de la vegetación semiboscosa [3]. La fruta de borojó es rica en vitaminas del complejo B, hierro, magnesio, calcio, fósforo, aluminio, silicio, magnesio, contiene aminoácidos esenciales como Triptófano, Lisina, Cisteína y Leucina [19]. En el año 2020, el área sembrada con borojó en Colombia fue 2,800 has, de ellas 80.5 ha en Antioquia, y 1,572 en el Chocó. La productividad promedio nacional en el año 2020 fue de 6.45 ton/ha, en Antioquia 4.95 ton/ha, en Chocó 4.44 ton/ha, en tanto que el Valle del Cauca alcanzó 12 ton/ha [5]. En la Amazonía ecuatoriana en sistemas tecnificados la productividad está entre 8 y 10 ton/ha [20].

La producción de borojó a orillas de los ríos Atrato y Buchadó, se caracteriza por el arreglo agroforestal (en asocio con cedro y roble), bajo a nulo uso de plaguicidas y fertilizantes de síntesis, ninguna selección de parentales, relación de individuos hembra/macho no optimizada, poca asistencia técnica, ninguna transformación,

presencia de intermediarios comerciales que llevan la fruta a las ciudades de Turbo, Quibdó y Medellín.

El consumo de borojó por las comunidades negras e indígenas del departamento del Chocó está asociado a sus propiedades energéticas, nutritivas y medicinales incluyéndole denominaciones de afrodisiaco natural [4, 21]. A pesar de sus bondades que la llevan a calificación de súper fruta, su consumo no se ha popularizado en todo el país [22].

Las altas temperatura media y humedad relativa del territorio, así como la actividad de agua de la fruta de borojó, sumado a que se trata de un fruto no climatérico (se cosecha en madurez de consumo comercial), configuran un reto de poscosecha. Si bien el tratamiento con refrigeración (evaluado *ex situ*), fue el mejor en conservación del peso de la fruta, incidencia de hongos y mayor aceptación general de la fruta, el territorio no se encuentra conectado al sistema eléctrico nacional, por lo tanto, no se cuenta con esta tecnología. A partir de las evaluaciones realizadas, se propone un sistema de manejo de cosecha en campo, transporte hasta el sitio de acopio, selección, desinfección, secado y empaque en estructura de polietileno con poliamida, embalaje en cajas de cartón de un solo nivel de fruta que permitan su vida útil de 3 a 4 semanas libres de hongos de géneros *Penicillium* spp documentados en trabajos y en previos [23].

Las posibilidades tecnológicas de la agroindustria permiten ampliar el abanico de la cadena de valorización en la elaboración de jugos y concentrados de frutas, congelados de pulpa de fruta, frutas deshidratadas, vinos, compotas, jaleas, salsas, mermeladas y productos en polvo, este último, con potencial aplicación en bebidas energizantes, suplementos alimenticios, alimentos funcionales, envases bioactivos, productos de cosmetología entre otras [24]. El proyecto permitió la formulación de pulpa de borojó con la combinación de tratamientos térmico y químico (benzoato de sodio al 0.1%), que permiten su vida útil por 15 días sin necesidad de refrigeración. Así mismo se definió la formulación de mermelada, como método de conservación transformación y obtención del valor agregado.

Se diseñó la planta de poscosecha de borojó con enfoque “cero residuos”, además de los brazos fruta fresca y fruta transformada, la fruta descartada, las semillas, la cáscara serán usados para elaboración de harinas que se incorporen a la alimentación de animales, se considera además la elaboración de bebidas fermentadas o licor de borojó. En lo arquitectónico se buscó la integración del cumplimiento de los requisitos sanitarios, con los determinantes naturales y sociales del diseño: construcciones palafíticas a dos aguas, generosamente

comunicadas con el exterior. El proyecto de construcción de la planta será presentado a diferentes fondos de financiación.

Se recomienda el diseño y establecimiento de un campo escuela en la comunidad, una parcela que facilite la integración de saberes, el diagnóstico de necesidades locales, la apropiación social de conocimiento; que contribuya a la transformación de la realidad, el mejoramiento de las condiciones de vida y la permanencia de la población en su territorio.

5. Conclusiones

El sistema de producción de borojó en Buchadó se caracteriza por su bajo nivel de tecnificación y asistencia técnica, en suelos aluviales, con pH ligeramente por debajo de la neutralidad, bajos contenidos de materia orgánica y potasio, y altos en Calcio y Magnesio.

Las oportunidades de mejora del sistema de producción de borojó en las orillas del río Atrato, incluyen: clonación asexual de "árboles tipo" por las características deseadas de producción, arquitectura y fitosanitarias; optimizar la relación de individuos hembra/macho; adoptar un arreglo espacial de los componentes frutal y maderables del agroecosistema.

La combinación de atributos biológicos (fruto no climatérico cosechado en madurez comercial, con alta actividad de agua), ambientales (altas precipitación y temperatura media), y del territorio (sin conexión al sistema eléctrico nacional, por tanto, sin posibilidad de refrigeración), constituye un reto para poscosecha de la fruta fresca de borojó y sus derivados agroindustriales.

Para la cosecha y poscosecha de fruta fresca de borojó se recomienda la recolección oportuna (sin sobremadurez), transporte en canastilla de un solo nivel hasta el sitio de acopio, selección de frutos sanos, desinfección por inmersión con solución de hipoclorito de sodio, secado, empaque en estructura polietileno con poliamida y embalaje.

Se formularon pulpa y mermelada de borojó con métodos físico – químicos, no dependientes de cadena de frío, que además de conservación de la fruta, constituyen valor agregado.

Se diseñó la planta de poscosecha de borojó con integración de criterios sanitarios (normatividad ICONTEC e INVIMA), naturales (construcciones palafíticas a dos aguas) y sociales (interconexión interior-exterior).

Contribución de los autores: conceptualización, dirección general, metodología agronómica, consecución de fondos e informe final Jhon W. Mejía-Montoya; metodología agroindustrial Carlos J. Márquez-Cardozo y Héctor J. Ciro-Velásquez, acompañamiento al proceso de formalización de la Asociación de Agricultores de Buchadó y apoyo en actividades de campo María A. Monsalve Vásquez; diseño arquitectónico Isabela Coronado Magalhães; toma de datos, elaboración de informe inicial agronómico Cristian Cano Correa, de sistema de manejo de fruta fresca Víctor A. Madrid Sánchez, de transformación agroindustrial Paula A. Zuluaga Ortega. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: este proyecto fue posible gracias a la activa participación de la de la comunidad de Buchadó, organizada en la Asociación de Agricultores de Buchadó ASOAGRIBU. La financiación se hizo con recursos de la Universidad Nacional de Colombia, el proyecto fue beneficiado de la Convocatoria Nacional de Extensión Solidaria 2023: Armonización de las funciones misionales para promover el desarrollo sustentable y construcción de paz en los territorios. La empresa privada ALICO S.A.S. hizo un valioso aporte en especie de consultoría con su equipo de profesionales en diseño y con material de empaque.

Conflicto de intereses: los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

1. Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. Población negra, afrocolombiana, raizal y palenquera. Resultados censo nacional población y vivienda 2018. 2021.
2. Gobernación de Antioquia, Gerencia de corregimientos. Vigía del fuerte. Disponible en: https://corregimientos.antioquia.gov.co/.
3. Córdoba, J. A. El cultivo del borojó. Rev. El cacaotero colombiano 1998, Vol. 11, Núm. 36, pp. 35-50.
4. Lasso R, N. El borojó, un fruto con sabor a litoral pacífico. Información práctica basada en investigaciones, Universidad del Pacífico. 2020.
5. Agronet. Estadísticas: Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. Disponible en: Estadísticas home
6. Gobernación del Chocó. *Plan de Desarrollo Departamental 2024-2027: El Chocó en Ruta Hacia el Progreso*. Quibdó: Gobernación del Chocó. 2024.
7. Departamento Nacional de Planeación (DNP). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia, potencia mundial de la vida*. Bogotá. 2022.
8. Fals Borda, O. El problema de cómo investigar la realidad, para transformarla. Bogotá. Tercer Mundo. Fondo Acción. Red de fondos ambientales de Latinoamérica y el Caribe RedLAC. 1989.
9. Schejtman, A. y Berdegué, J. Desarrollo territorial rural. RIMISP. Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural. Debates y temas Rurales N° 1. 2004.
10. Sepúlveda, S. Gestión del desarrollo sostenible en territorios rurales: Métodos para la planificación. San José de Costa Rica. 2008.
11. Ramos, E., Garrido, D. Desarrollo rural territorial. Metodología y aplicación para el estudio de casos. Madrid. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2011.
12. Dewey, J. Teoría de la Educación y sociedad. Fundamentos sobre las ciencias del hombre. Centro editor de América Latina. 1951. Disponible en: C:\Documents and Settings\fandre\Escritorio\Dewey - La ciencia de la educacion.pdf.
13. Hart, R. Conceptos básicos sobre agroecosistemas. Serie materiales de enseñanza N°1. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza CATIE. Turrialba, Costa Rica. 1985.
14. Codex Alimentarius Commission. *Norma para las confituras, jaleas y mermeladas (CODEX STAN 296-2009)*. Recuperado de FAO. 2009.
15. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). *NTC 285. Mermeladas y jaleas de frutas*. Bogotá: ICONTEC. 2007.

16. Ministerio de Salud y Protección Social. *Resolución 2674 de 2013*. Por la cual se reglamenta el artículo 126 del Decreto Ley 019 de 2012 y se dictan otras disposiciones. Bogotá, 2'13. Diario Oficial No. 48.862.
17. Bandh, S. A., Kamili, A. N., & Ganai, B. A. Identification of some Penicillium species by traditional approach of morphological observation and culture. Afr. J. Microbiol. 2011, Res 5(21).
18. Haveri, A. Strategy of comparative advantage in local communities. En Oulasvirta, L. (Ed.), Finnish Local Government in Transition, 1996, 4 (22). Citado por: SEPÚLVEDA, S. Gestión del desarrollo sostenible en territorios rurales: Métodos para la planificación. San José de Costa Rica. 2008.
19. Vélez Acosta, L. El Borojó, una superfruta. Revista Alimentos, 2015. Disponible en: El borojo, una superfruta
20. Medrano, S. Obtención de deshidratados de borojó (*Borojoa patinoi*) y copoazú (*Theobroma grandiflorum*) mediante procesos térmicos de secado con aire forzado. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2010.
21. Sotelo, I., Casas, N. & Camelo, G. Borojó (Borojoa patinoi): Fuente de polifenoles con actividad antimicrobiana. Revista de la Facultad de Química Farmacéutica (VITAE). 2010, 17 (3), pp. 329-336.
22. Mesa, J. Borojó, la Súper Fruta Colombiana. ANeIA Agronegocios, Industria Alimentarios y Turismo de Naturaleza. 2021. Disponible en: Borojó, la Súper Fruta Colombiana - ANeIA
23. Mejía, M. Borojó. Fruta Ecuatorial Colombiana, Colombia Amazónica, 1984, 1(2), pp. 89-106.
24. Londoño Jaramillo, W. *Manejo post-cosecha y comercialización de borojó (Borojoa patinoi Cuatr).* Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y Natural Resources Institute (NRI). 1999.

Do urban agricultural initiatives meet the needs of local authorities? - A Multi-Method Analysis

Ouiam Fatiha Boukharta [1], Loïc Sauvée [2], Leticia Chico Santamarta[3] and Luis Manuel Navas Gracia [1,*]

[1] TADRUS Research Group, Department of Agricultural and Forestry Engineering, University of Valladolid, 6, Spain; ouiamfatiha.boukharta@uva.es , luismanuel.navas@uva.es

[2] InTerACT Research Unit, Institut Polytechnique UniLaSalle, 76130 Rouen, France; loic.sauvee@unilasalle.fr ,

[3] Global Impact Department, Harper Adams University, Edgmond, Shropshire TF10 8NB, United Kingdom; lchico-santamarta@harper-adams.ac.uk

* Correspondence: luismanuel.navas@uva.es

Abstract: Population food sufficiency is threatened by urbanization and population growth, and where urban agriculture is seen as a solution to contribute to food production and resilience. This investigation examines the creation of urban agriculture projects, through an analysis of multi-level governance between different entities, including local authorities and project promoters, with the aim of making a comparison between the perspectives and objectives that local authorities seek to achieve in cities and what is realized on the ground. This objective is achieved through a qualitative analysis based on interviews with various stakeholders from different entities in France's Normandy region. The results revealed a positive alignment on polycentric governance between different units in terms of social integration, cost savings and environmental aspects, all of which were achieved by the cases evaluated and are aligned with aspects of the sustainable development goals. However, achieving total food self-sufficiency has not been reached yet, which represents a limitation and a challenge. This combined approach of interviews and fieldwork provides an in-depth understanding of the authorities' needs and requirements, and an assessment of the existence of polycentric governance within several units, which could serve as a basis for future studies pursuing this objective.

Keywords: Urban Agriculture; Food Sufficiency; multi-level governance; polycentric governance; sustainable development

1. Introduction

Food is a fundamental human need, but its production is facing growing challenges, including population growth and dwindling water resources worldwide [1]. Food security depends on several factors, such as stability of supply, accessibility and availability, and is closely linked to livelihoods [2]. Today, the main threats to food

security include climate change, rapid urbanization and changing consumption patterns [3].

Faced with these challenges, urban agriculture is emerging as a strategic alternative, integrating agricultural practices into urban spaces, community gardens, green roofs, micro-farms etc. [4], and where it can be implemented on many surfaces, even the smallest, enabling dynamic interaction with the urban ecosystem [5]. In addition to producing food locally, it plays a key role in improving air and water quality, while contributing to the sustainability of cities [6]. Its impact also extends to the social and economic spheres, promoting community cohesion, job creation and social inclusion [7].

From this perspective, urban agriculture contributes to sustainable development objectives, particularly in terms of environmental protection, health, nutrition and poverty reduction [8]. This article aims to examine these aspects through case studies of urban agriculture, integrating the dimension of polycentric governance, essential to ensure the structuring and viability of these initiatives. Polycentric governance is based on collaboration between various stakeholders - farmers, local authorities, non-governmental organizations - who co-construct regulatory frameworks adapted to local contexts. It enables decentralized decision-making, where each stakeholder can participate in shaping rules and policies according to his or her needs and responsibilities.

Within this framework, the study explores how the interaction between these multiple stakeholders ensures equitable resource management and effective coordination of local initiatives. Moreover, polycentricity relies on flexible institutional arrangements, which facilitate the implementation of agricultural practices adapted to specific urban environments [9]. This approach is particularly relevant to structuring the governance of urban agriculture, ensuring synergy between different levels of decision-making [10]. By integrating these principles, this study contributes to a better understanding of the mechanisms underlying the sustainable development of agricultural initiatives in urban environments.

2. Materials and Methods

2.1. Concepts and definitions

2.1.1. Urban Agriculture

Urban agriculture encompasses a variety of agricultural activities located in urban or peri-urban settings, bringing food, social, economic and environmental benefits to residents [11]. It contributes to improved health, community resilience and

reduced inequalities [12]. However, its main objective is not mass food production, but rather the development of more sustainable and inclusive communities [13]. While it cannot replace traditional food channels, it complements them by diversifying supply and raising awareness of more sustainable practices.

Nevertheless, over-reliance on urban agriculture for food security, without adequate institutional support, can lead to a transfer of responsibilities to local communities, without a guarantee of sufficient autonomy [14]. Its expansion requires effective coordination between authorities, developers, residents and private stakeholders [15], while overcoming the challenges associated with polycentric governance [16,17].

2.1.2. Polycentric governance

Polycentric governance is based on the interaction of multiple decision-making centers at different scales, enabling more flexible and shared management of resources and policies. This model promotes more inclusive governance, stimulates innovation and enables rapid adaptation to local challenges [18].

By distributing responsibilities between central, regional and local levels, it ensures a better match between interventions and community needs [19]. In the context of urban agriculture, this approach enables more effective coordination between stakeholders and better integration of projects into urban development strategies (Figure 1).

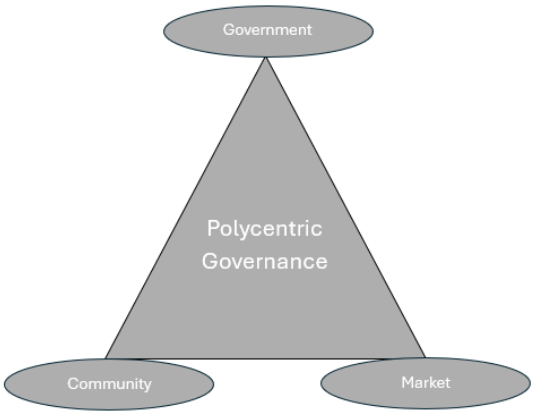


Figure 1. Polycentric Governance on the central Government-Market-Community axis [20].

2.1.2. Scope of this investigation

The aim of this study is to analyze the alignment between metropolitan and urban policy frameworks and the implementation of urban agriculture initiatives. It focuses on the application of a polycentric governance framework and an experimental field approach to examine urban agriculture projects in France,

particularly in the metropolis of Rouen and its central city, and their contribution to urban resilience. The study also assesses the integration of these initiatives into sustainable development objectives and the transition to green cities, considering the impact of governance structures on their coordination and effectiveness. The analysis aims to identify how various actors, such as local authorities, project developers and local communities, interact and make decisions at different scales (local, regional and global). These multiple centers of authority operate independently yet collaborate to ensure shared governance, based on cooperation and mutual accountability, rather than centralized management.

2.2. Data Collection

Data were collected through semi-structured interviews, a qualitative method enabling in-depth exploration of participants' perceptions and experiences. An interview guide prepared by the research team provided a structured framework, while offering flexibility in the order of questions to adapt to interview dynamics [21]. Participants were selected based on purposive sampling, enabling in-depth analysis at different scales and from multiple angles, while incorporating detailed qualitative data on their perspectives [22]. A systematic thematic analysis was applied to identify and interpret significant patterns in the data collected, facilitating the emergence of new concepts [23].

A total of 28 interviews were conducted, adopting a multimodal approach combining face-to-face meetings, telephone calls and online meetings to suit participants' availability [23]. This flexibility made it possible to incorporate a diversity of viewpoints while considering logistical constraints and stakeholder preferences [24]. Each interview was recorded with the informed consent of the participants, in accordance with the ethical principles of research [25], and fully transcribed to ensure rigorous and accurate analysis.

This analysis covered several assessment dimensions, including the metropolis, the city, and real-life urban agriculture practices, all selected using a purposive sampling approach and a polycentric governance analysis to ensure relevance and diversity of perspectives, resulting in a multi-level governance assessment, as illustrated in Figure 2.

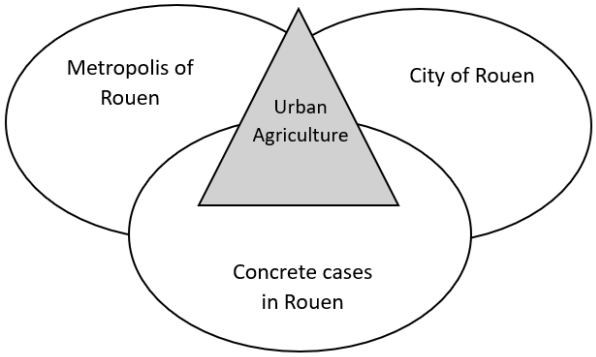


Figure 2. Multi-level Governance of Urban Agricultural Projects [20].

The multi-level governance strategy generates rich, narrative qualitative data, essential for a nuanced understanding of systemic relationships and social interactions. The results obtained provide a valuable empirical basis for strategic recommendations and the strengthening of future urban planning [26]. What's more, combining this methodology with a polycentric governance analysis highlights disparities and similarities between existing public policies and operational practices, improving the ability to define an effective trajectory for urban transformation towards sustainability [27].

2.3. Study area

2.3.1. Normandy Region- France

This investigation was carried out in Normandy, a region in northern France widely recognized for its agricultural potential, partly unexplored in other studies, as well as for the ongoing urban support of local authorities. The local economy is particularly strong in the agricultural and agri-food sectors, although relatively modest compared to the rest of France, notably Île-de-France [27]. The Rouen Metropolis, a group of 71 communes including the city of Rouen [28], plays a central role in the region's sustainable development. It optimizes quality of life and promotes innovative initiatives such as urban farms and community gardens, which promote biodiversity while providing recreational and educational opportunities for citizens.

Rouen, located on the banks of the Seine, is the historic capital of Normandy [29], known for its rich cultural and historical heritage. In terms of urban agriculture, the city of Rouen is committed to the integration of green spaces and urban agricultural projects, with the creation of community and family gardens aimed at strengthening local and sustainable food production, while promoting social ties and environmental awareness [17].

2.3.2. Urban agricultural cases evaluated

"Le champ des possibles" is a non-profit association active in the city of Rouen and the city of Sotteville in the metropolis of Rouen. It is dedicated to urban agriculture and the ecological rehabilitation of urban wastelands, transforming these spaces into areas dedicated to biodiversity and local agriculture, while facilitating access to healthy food [17]. The association also organizes awareness-raising and training activities, promoting a collective and participatory approach among residents. It collaborates with public institutions and enjoys the support of local authorities to enrich urban spaces and strengthen social cohesion [30].

"Le jardin de l'Astéroïde" is an allotment garden association that promotes agroecological practices in an urban environment. It enables residents to grow their own fruit and vegetables in individual plots while respecting environmentally friendly practices, without chemicals or sales. The garden, laid out on a former parking lot, has helped to enhance the area and improve biodiversity [31]. Supported by the city of Rouen, the association is working with other local stakeholders to strengthen urban agriculture initiatives and integrate educational and community dimensions.

3. Results

This section may be divided by subheadings. It should provide a concise and precise description of the experimental results, their interpretation, as well as the experimental conclusions that can be drawn.

3.1. Stakeholders objectives

Both the metropolis and the city and urban agriculture initiatives studied aim to strengthen empowerment and decentralized decision-making, while respecting the polycentric governance approach. The metropolis of Rouen emphasizes that the creation of these spaces is in line with France's zero net artificialization law, aimed at limiting environmental impact and encouraging the denaturalization of urbanized areas by up to 66%. This approach reflects the metropolis of Rouen's commitment to local ecological sustainability, improving air quality and urban living conditions, as well as strengthening food self-sufficiency, a key point mentioned by all metropolitan respondents. In the city of Rouen, employability is a key issue, enabling individuals to enter and re-enter the labor market while strengthening social ties. The stakeholders interviewed stressed the importance of neighborhood and intergenerational interactions, underlining the human dimension of the project.

Another key objective is the rehabilitation of wasteland into cultivated areas, promoting environmental sustainability and food self-sufficiency. In addition, those responsible for the urban agriculture initiatives studied emphasize the need to transform wasteland into shared gardens to avoid it being used for other purposes, while optimizing the use of urban space. This approach also aims to develop agricultural skills and increase the greening of the city, thereby contributing to soil conservation, human well-being and the strengthening of social ties.

3.2. Benefits of Urban Agricultural projects

Another key objective is the rehabilitation of wasteland into cultivated areas, promoting environmental sustainability and food self-sufficiency. In addition, those responsible for the urban agriculture initiatives studied emphasize the need to transform wasteland into shared gardens to avoid it being used for other purposes, while optimizing the use of urban space. This approach also aims to develop agricultural skills and increase the greening of the city, thereby contributing to soil conservation, human well-being and the strengthening of social ties.

Interviews with a variety of stakeholders have enabled us to assess the impact of urban agriculture on local residents, highlighting both convergences and divergences along the three dimensions of sustainability: social, economic and environmental. In social terms, urban agriculture plays a key role in strengthening social ties, fostering interaction, integration and well-being among participants, while offering a valuable reconnection with nature. The economic aspect is also emphasized, notably through the satisfaction derived from the production and consumption of healthy, varied food. Finally, in environmental terms, these initiatives contribute to the preservation of biodiversity and water resources, by enhancing the renaturation of urban spaces and improving water infiltration, thus helping to replenish water tables.

3.3. Criteria of choosing an urban agricultural project

The development of an urban area is based on several criteria that influence the decisions of local authorities when choosing a project:

Among the common requirements identified was the prior analysis of the soil to assess its suitability for food production and to identify any need for soil amendments. For example, as part of the “champ des possible” project, 40 cm of soil had to be replaced to guarantee optimum quality, although this measure had not initially been planned. Another key criterion is food autonomy, aimed at ensuring fair and sufficient access to healthy food, an objective shared by the initiatives

evaluated. Finally, optimizing and preserving water resources is also a priority for local authorities and project developers.

The third shared criterion concerns the sustainable management and preservation of water resources. The protection of drinking water catchment areas is a long-standing regulatory requirement, requiring local authorities to implement strict measures to guarantee the quality and availability of this resource. These regulations play an essential role in reconciling increasing urbanization with environmental imperatives.

3.4. Alignment with the Authorities' Priorities

The interviews highlighted the complementarity between the needs of local authorities and the responses provided by urban agriculture initiatives. The metropolis of Rouen stresses the importance of public health and awareness-raising, claiming that the urban agricultural projects fully meet these expectations. For their part, local authorities and project managers emphasize the positive impact on social and economic integration, while encouraging local production which, albeit modest, enables residents to reduce certain expenses.

Despite its benefits, urban agricultural projects cannot ensure the city's food self-sufficiency, as the Chairman of the "champ des possible" pointed out. However, it does make a partial contribution to this objective, which remains a positive result. The institutional stakeholders recommend exploring innovative initiatives, including the introduction of specific crops, to enhance its attractiveness and impact. This dynamic is part of a polycentric governance framework, in which local authorities and project promoters work together to ensure shared, decentralized management of the urban agricultural projects. This model encourages greater adaptability to local issues, particularly in terms of public health and social integration, while strengthening urban resilience.

3.5. Limitations and future recommendations

This study highlights two major challenges for participatory urban agriculture: its limited contribution to food self-sufficiency and its long-term viability. Although the aim is to feed the inhabitants, urban density and lack of space make this ambition difficult to achieve. Local authorities are also concerned about the long-term viability of participatory urban agriculture, while project promoters denounce the scarcity of available land, which is often reserved for property development. However, solutions are emerging, such as vertical agriculture, rooftop farming and the integration of participatory urban agriculture into urban policies, thereby promoting sustainable food systems and city resilience.

4. Discussion

This research explores the interactions between the actors involved in a multi-level governance framework, assessing the response of participatory urban agriculture practices to the expectations of local authorities. Conducted in the city of Rouen and its metropolis, it is based on 28 in-depth interviews with institutional representatives and project leaders.

The analysis highlights the strategic objectives shared by the three entities: guaranteeing healthy, accessible food, promoting learning and strengthening the link between city dwellers and the local environment. These dimensions fall within the three pillars of sustainability-social, economic and environmental-as described by Menconi et al [11]. In addition to contributing to food resilience, these initiatives offer employment opportunities, particularly for retirees and jobseekers, an impact also highlighted by [32].

The analysis emphasizes the importance of an integrated framework that fosters cooperation between stakeholders. The results show that the participatory approach, supported by polycentric governance, facilitates the establishment of effective partnerships and the reconciliation of divergent interests. Improved communication mechanisms and the alignment of objectives thus strengthen the collective impact on urban agriculture, contributing to more sustainable and resilient cities.

In this study, all stakeholders confirm the benefits of this approach, characterized by mutual satisfaction at different scales. This perspective concurs with the findings of Saint-Ges et al [31], who emphasize its role in maximizing synergies and optimizing resources. However, divergences persist regarding food self-sufficiency: local authorities aspire to greater autonomy through urban agricultural projects, while urban practitioners struggle to meet supply needs due to land constraints and urban pollution issues.

Finally, the findings also underline a major constraint linked to the criteria imposed on urban agricultural projects developers, particularly about land availability. In metropolitan areas, there are far more vacant spaces dedicated to urban agriculture than outside the city.

5. Conclusions

Urban agriculture is a key lever for sustainable, balanced nutrition in urban environments, while promoting social integration and well-being, and generating

economic and environmental benefits [18]. To achieve these objectives, rigorous and sustainable project management is essential, as this research article shows.

This investigation sheds light on urban agricultural practices' governance, particularly in the context of the polycentric governance, where the results show that local authorities closely monitor project implementation and provide ongoing support to project leaders over the long term. This support, enhanced by feedback from project leaders, underlines the effectiveness of the collaboration between local authorities and urban agricultural projects promoters, creating an environment conducive to greater involvement of local players.

At the metropolitan level, the spaces available for urban agriculture are more extensive than in the city, but these areas must meet strict planning criteria, requiring implementation criteria to be adapted to the specificities of each context while considering space constraints and urban planning objectives. However, developers would appreciate greater flexibility in the application of these rules.

This research explores the link between different entities in urban agriculture using a polycentric governance analysis and a multi-level perspective approach, thus making an original contribution. It evaluates the results of three distinct entities to check whether the expectations of local authorities match the objectives of the projects carried out, focusing on the Czech Republic and France. Future research could draw on this methodology to analyze the compatibility between the needs of local authorities and actual practices in different cities and countries. This work would also be useful to planners, architects and urbanists in shaping the future dynamics of urban agricultural projects by promoting sustainable local food and resilient cities, along economic, social and environmental dimensions.

6. Patents

Author Contributions: Conceptualization, O.F.B., L.M.N.-G. and L.C.-S.; methodology, O.F.B., L.C.-S., L.S. and L.M.N.-G.; software, O.F.B., L.S. and L.C.-S.; validation, L.C.-S., L.M.N.-G. and L.S.; formal analysis, O.F.B., L.S., L.C.-S. and L.M.N.-G.; investigation, O.F.B. and L.C.-S.; resources, L.M.N.-G. and L.C.-S.; writing—original draft preparation, O.F.B.; writing—review and editing, O.F.B., L.C.-S., L.S. and L.M.N.-G.; visualization, O.F.B., L.C.-S., L.M.N.-G. and L.S.; supervision, L.S., L.C.-S. and L.M.N.-G.; project administration, L.M.N.-G.; funding acquisition, L.M.N.-G. and L.C.-S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The present work is related to the FUSILLI Project, which is funded by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program under the grant agreement No. 101000717 (https://fusilli-project.eu/) (accessed on 10 December 2024).

Data Availability Statement: Data is contained within the article.

Acknowledgments: Ouiam Fatiha Boukharta has been financed under the call for University of Valladolid 2021 predoctoral contracts, co-financed by Banco Santander.

Conflicts of Interest: "The authors declare no conflict of interest."

References

1. Kolagar, M. Adherence to urban agriculture in order to reach sustainable cities; a BWM–WASPAS approach. Smart Cities 2019, 2, 31–45..
2. Mbow, C.; Rosenzweig, C.E.; Barioni, L.G.; Benton, T.G.; Herrero, M.; Krishnapillai, M.; Diouf, A.A. Food Security; No. GSFCEDAA-TN78913; IPCC: Geneva, Switzerland, 2020.
3. Karthika, D.P.; Karthikeyan, P. Urbanization, food insecurity and agriculture–challenges for social sustainable development. Probl. Ekorozwoju–Probl. Sustain. Dev. 2016, 12, 157–162.
4. Knickel, K.; Zemeckis, R.; Tisenkopfs, T. A critical reflection of the meaning of agricultural modernization in a world of increasing demands and finite resources. In Proceedings of the International Scientific Conference «Rural development 2013», Akademija, Lithuania, 28–29 November 2013; Volume 6, pp. 561–567.
5. Mougeot, L.J. Urban Agriculture: Definition, Presence, Potentials and Risks, and Policy Challenges; Cities Feeding People Series; Report 31; IDRC: Ottawa, ON, Canada, 2000.
6. Ferreira, A.J.; Guilherme, R.I.; Ferreira, C.S. Urban agriculture, a tool towards more resilient urban communities? Curr. Opin. Environ. Sci. Health 2018, 5, 93–97.
7. Mohiuddin, M.; Al Mamun, A.; Syed, F.A.; Mehedi Masud, M.; Su, Z. Environmental knowledge, awareness, and business school students' intentions to purchase green vehicles in emerging countries. Sustainability 2018, 10, 1534.
8. Azunre, G.A.; Amponsah, O.; Peprah, C.; Takyi, S.A.; Braimah, I. A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse. Cities 2019, 93, 104–119.
9. Aligica, P.D.; Tarko, V. Polycentricity: From Polanyi to Ostrom, and beyond. Governance 2012, 25, 237–262.
10. Manganelli, A. The Hybrid Governance of Urban Food Movements: Learning from Toronto and Brussels; Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany, 2022.
11. Menconi, M.E.; Heland, L.; Grohmann, D. Learning from the gardeners of the oldest community garden in Seattle: Resilience explained through ecosystem services analysis. Urban For. Urban Green. 2020, 56, 126878.
12. Fleury, A.; Ba, A. Multifunctionality and sustainability of urban agriculture. Urban Agric. Mag. 2005, 15, 4–6.
13. Cohen, N. Policy Brief: New Directions for UA in NYC; CUNY Urban Food Policy Institute: Harlem, NY, USA, 2016.
14. Horst, M.; McClintock, N.; Hoey, L. The intersection of planning, urban agriculture, and food justice: A review of the literature. In Planning for Equitable Urban Agriculture in the United States: Future Directions for a New Ethic in City Building; Springer: Cham, Switzerland, 2024; pp. 89–120.
15. Mailhot-Leduc, I. L'agriculture Urbaine et la Mise en Débat du Projet Urbain: Une Consultation Publique à Montréal. Ph.D. Thesis, Université du Québec à Montréal, Montréal, QC, Canada, 2014.
16. De Oliveira, J.A.; Ahmed, A. Governance of urban agriculture in African cities: Gaps and opportunities for innovation in Accra, Ghana. J. Clean. Prod. 2021, 312, 127730.
17. Boukharta, O.F.; Pena-Fabri, F.; Chico-Santamarta, L.; Navas-Gracia, L.M.; Sauvée, L. Governance structures and stakeholder's involvement in Urban Agricultural projects: An analysis of four case studies in France. Int. Food Agribus. Manag. Rev. 2023, 27, 76–93.
18. Morrison, T.H. Evolving polycentric governance of the Great Barrier Reef. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2017, 114, E3013–E3021.
19. Morrison, T.H.; Bodin, Ö.; Cumming, G.S.; Lubell, M.; Seppelt, R.; Seppelt, T.; Weible, C.M. Building blocks of polycentric governance. Policy Stud. J. 2023, 51, 475–499.
20. Boukharta, O. F., Sauvée, L., Chico-Santamarta, L., Pena-Fabri, F., & Navas-Gracia, L. M. (2024). Reality vs. Expectations in the Implementation of Urban Agricultural Projects—A Polycentric Governance Analysis. *Urban Science*, *8*(4), 260.
21. Creswell, J.W. Educational Research: Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research; Pearson: London, UK, 2015.
22. Thurman, N. Mixed methods communication research: Combining qualitative and quantitative approaches in the study of online journalism. In SAGE Research Methods Cases; Sage: Thousand Oaks, CA, USA, 2018.

23. Turk, M.; Turk, S.T.; Muftuoglu, A.C.; Karakaya, O.; Karakaya, K. Students' Expectations and Experiences about Engagement Strategies in Online Courses: A Mixed Methods Study. Online Learn. 2024, 28, n2.
24. Oliffe, J.L.; Kelly, M.T.; Gonzalez Montaner, G.; Yu Ko, W.F. Zoom interviews: Benefits and concessions. Int. J. Qual. Methods 2021, 20, 16094069211053522.
25. Nesbitt, L.; Hotte, N.; Barron, S.; Cowan, J.; Sheppard, S.R. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: A review and suggestions for future research. Urban For. Urban Green. 2017, 25, 103–111.
26. Caughman, L.; Beaudoin, F.;Withycombe Keeler, L. The project-partnership cycle: Managing city-university partnerships for urban sustainability and resilience transformations. Urban Transform. 2023, 5, 10.
27. Insee. Estimations de Population par Sexe et âge au 1er Janvier 2024. 2024. Available online: https://www.insee.fr/fr/statistiques/8069529 (accessed on 10 December 2024).
28. Lestel, L.; Meybeck, M.; Carré, C.; Belliard, J. The seine, the river dedicated to Paris. In River Culture–Life as a Dance to the Rhythm of the Waters; UNESCO Publishing: Paris, France, 2023; pp. 673–697.
29. García-Llorente, M.; Rossignoli, C.M.; Di Iacovo, F.; Moruzzo, R. Social farming in the promotion of social-ecological sustainability in rural and periurban areas. Sustainability 2016, 8, 1238.
30. Tulla, A.F.; Vera, A.; Valldeperas, N.; Guirado, C. Social return and economic viability of social farming in Catalonia: A case-study analysis. Eur. Countrys. 2018, 10, 398–428.
31. Saint-Ges, V.; Warin, B.; Jacobsohn, A. Public Urban Agriculture Equipment: A Tool for Fair and Sustainable Food Policies? Potager du Roi and Cité Maraîchère, Two French Case Studies. Sustainability 2024, 16, 7399.
32. Balmer, D.F.; Richards, B.F. Conducting qualitative research through time: How might theory be useful in longitudinal qualitative research? Adv. Health Sci. Educ. 2022, 27, 277–288.

Modelação do volume de chorume produzido por matrizes, nas fases de maternidade e gestação, no Brasil: uma abordagem inicial

Carlos Ameixa [1], Paulo Armando V. de Oliveira [2], Arlei Coldebella [2], Paulo Belli Filho[3], Jorge M. R. Tavares[1,4,5]

[1] Instituto Politécnico de Beja; Escola Superior Agrária, 7800-309 Beja, Portugal

[2] EMBRAPA SUÍNOS E AVES, Caixa Postal 21, 89.700-000 Concórdia/SC, Brasil

[3] Universidade Federal de Santa Catarina, Dpto. Eng. Sanitária e Ambiental – UFSC – Caixa Postal 476, Trindade, 88010970 – Florianópolis, SC- Brasil

[4] Center for Sci-Tech Research in EArth sysTem and Energy (CREATE), Polo IPBeja, Apartado 6155, 7800-295 Beja, Portugal

[5] Fiber Materials and Environmental Technologies (FibEnTech-UBI), Universidade da Beira Interior, Rua Marquês de D'Ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal

Abstract: An initial model was developed to predict the volume and composition of sow manure in the gestation and maternity phases, based on studies. The model was validated using data from a project (14 months) on farms in southern Brazil. Water and feed flows were used as inputs to predict the amount of manure produced. This model takes into account the effects of each phase, animal performance, feed and the building. The gestation model was validated on 29 batches of sows (2490 sows in individual housing [G1] and 1790 in collective housing [G2]), with a total measurement of five weeks per batch. The estimated results of the maternity model were validated on the basis of 26 batches, with a total of 862 sows, considering the same time period as the gestation batch. Daily manure production per sow during gestation was 15.2 ± 3.1 liters for G1 and 5.7 ± 1.5 liters for G2. In maternity, it was 18.9 ± 2.4 L/d sow. The models proved to be reliable and robust for predicting the volume of manure produced during gestation (R2 =0.80) and maternity (R2 =0.64), and are considered suitable for use in real production conditions on farms located in southern Brazil.

Keywords: Pig Production; Modeling; Slurry production; Estimating the volume of slurry produced

1. Introdução

A crescente necessidade e procura por alimentos representa um dos maiores desafios globais da atualidade. Este fenómeno é impulsionado, em grande parte, pelo aumento populacional, o que acarreta um maior consumo de recursos naturais essenciais, como água, matéria orgânica, nutrientes disponibilizados pelo solo e energia. Entre as diversas fontes de proteína animal, a produção suína vem-se

destacando, com um aumento de aproximadamente 140% na produção mundial entre os anos de 1961 e 2022, tornando-se uma das principais alternativas para atender à crescente necessidade de proteína animal [1,2,3].

No entanto, à medida que a produção suína se expande, surgem questões ambientais de grande relevância, pelo que a implementação de sistemas agroalimentares sustentáveis é essencial para alcançar um equilíbrio entre a produção de alimentos, a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade socioeconómica [4]

As explorações suinícolas, se não forem geridas de forma eficiente, podem provocar impactos ambientais significativos, como o consumo excessivo de recursos e a poluição da água, solo e ar. A contaminação hídrica, por exemplo, é uma preocupação crescente, especialmente devido à presença de nitratos que comprometem a qualidade da água e favorecem o aparecimento de processos de eutrofização. Adicionalmente, o acúmulo de nutrientes como azoto, fósforo, potássio, assim como os metais pesados (como zinco e cobre) prejudica a saúde do solo e afeta sua fertilidade [5,6,7,8,9].

Neste contexto, é fundamental que os sistemas de produção suinícola evoluam para modelos mais sustentáveis. Para tanto, é essencial quantificar os impactos ambientais associados a essa produção, permitindo a adoção de medidas preventivas e mitigadoras. O conhecimento detalhado sobre o consumo de água, o volume e as características físico-químicas do chorume produzido é crucial para uma gestão ambiental eficaz, a fim de reduzir os impactos económicos e sociais negativos e melhorar a qualidade do produto final [9,11]. Assim, o desenvolvimento, validação e adaptação de modelos matemáticos a partir de outros existentes na literatura [7,12,13,14], que estimam a produção e as características do chorume, surge como uma ferramenta indispensável para a tomada de decisão e para uma gestão mais eficiente e sustentável das explorações suinícolas [15].

No Brasil, a suinocultura é uma atividade de grande importância económica, com um efetivo de aproximadamente 48 milhões de suínos, tornando-se o quarto maior produtor e exportador mundial de carne suína, com uma produção anual de 4,5 milhões de toneladas e exportações de 1,4 milhões de toneladas [3]. Do total, cerca de 10,5% são matrizes suínas, representando o estado de Santa Catarina, onde este estudo foi realizado, uma parte significativa do efetivo. Em 2023, o estado abrigava um rebanho total de 9 milhões de suínos, sendo, aproximadamente, 11% de matrizes [16].

O objetivo deste estudo foi desenvolver e validar um modelo matemático para estimar o volume de chorume produzido por matrizes suínas nas fases fisiológicas de maternidade e gestação, adaptado às condições específicas das explorações suinícolas do sul do Brasil. Para tanto, foram utilizados, como referido anteriormente, dados da literatura e modelos matemáticos previamente estabelecidos [7,12,13,14,17].

2. Materiais e Métodos

O presente estudo foi realizado em explorações situadas no estado de Santa Catarina, na região Sul do Brasil, durante um período de 12 meses e abrangendo as estações quentes e frias do ano. A recolha dos dados primários foi realizada em Unidades Produtoras de Desmamados (UPD), localizadas na Mesorregião do Oeste Catarinense, nos municípios de Concórdia e Jaborá, tendo seguido a metodologia descrita anteriormente, para explorações das fases fisiológicas de creche e crescimento-terminação [7]. A seleção das três UPD avaliadas no decorrer do estudo, foi realizada com base em três critérios: (1) explorações localizadas na mesma área geográfica; (2) os produtores pertencerem à mesma agroindústria, com fluxos de produção semelhantes; e (3) viabilidade para a instalação de pequenas estruturas para uso de equipamentos de monitorização e investigação.

As explorações selecionadas alojavam matrizes com genética *Large White* X *Landrace*. O tipo de alojamento utilizado na fase de maternidade era individual (t=35 dias, em média) e a fase de gestação seguiu um esquema de divisão em dois períodos. No primeiro período (G1), do desmame até à confirmação da gestação (t=35 dias, em média), as matrizes foram alojadas em espaços individuais de 1,5 m², com piso de semivazado em cimento. No segundo período de alojamento (G2; t=70 dias, em média), as matrizes foram deslocadas para parques coletivos, com uma área superficial de 2,5 m² por matriz, sendo o piso totalmente em cimento, com o escoamento dos chorumes direcionado para uma canaleta situada fora dos edifícios de alojamento.

Com exceção das matrizes na G1 em que o fornecimento de água era realizado através de vasos comunicantes no piso, com controlo do volume com recurso a boia de nível, as demais matrizes, tanto na maternidade como na G2 dispunham de bebedouros específicos para a fase fisiológica (maternidade : *bite-ball* e chupeta convencional; G2: taça horizontal). Não foram efetuadas no decorrer do estudo recomendações específicas no que concerne à gestão da água nas explorações, avaliando-se o dia a dia dos diferentes produtores neste requisito.

Os consumos diários de água e o volume de chorume produzido foram registados, a cada 24 horas, pelos produtores. Para medir o volume total de água consumido, bem como os outros consumos (nebulização – para melhoria das condições ambientais e controlo sanitário e lavagem dos edifícios), foram utilizados hidrómetros (Unimag Cyble PN 10, Itron Inc., Liberty Lake, Washington). Para medir o volume de chorume produzido, foram utilizados tanques volumétricos com capacidade para 5 m³ (Fibratec e Fortlev). Semanalmente, foram recolhidas amostras de chorume para análise físico-química na Embrapa Suínos e Aves (Concórdia, Brasil), com avaliação dos seguintes parâmetros: sólidos (total, volátil e mineral), azoto total (N_{Tk}) e amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$), potássio total (K_T) e fósforo total (P_T).

A alimentação das matrizes foi realizada à base de milho e farinha de soja, seguindo as recomendações brasileiras, tendo sido distribuída uma vez por dia (às 08h00), durante os diferentes períodos de alojamento na fase de gestação (G1 e G2). Na fase de maternidade, as fêmeas receberam alimentação *ad libitum*, com exceção do dia do parto, ao primeiro sinal deste, e interrompida pelo produtor. Semanalmente, foram realizadas recolhas da ração fornecida à matrizes nas UPD para quantificação tanto da ingestão quanto da análise bromatológica na Embrapa Suínos e Aves (Concórdia, Brasil), tendo-se analisado entre outros parâmetros, os teores de matéria seca (MS), azoto total (N_{Tk}), potássio total (K_T) e fósforo total (P_T).

Em cada unidade, foram instalados *data-loggers* (Testo 174H) para registo de temperatura e humidade do ar, tanto interna como externa. Os dados foram registados a cada 30 minutos e, posteriormente, calculadas as médias diárias.

Na Tabela 1 exibem-se as médias dos dados técnicos e produtivos das UPD monitoradas e avaliadas.

Tabela 1. Média dos dados técnicos e produtivos das UPD monitoradas e avaliadas.

Parâmetro	**Gestação**		**Maternidade**
	G1	**G2**	
Peso das matrizes (kg)	180,2	189,5	200,0
Peso dos leitões (kg)	-	-	1,3
Peso leitões ao desmame (kg)	-	-	8,21
Duração do ciclo (d)	35	70	35
N.º leitões vivos	-	-	13,5
N.º porcas observadas	2490	1790	862
Consumo de alimentos (kg/d)	1,83 ± 0,10	2,44 ± 0,18	6,03 ± 0,19

Para o desenvolvimento, adaptação e validação dos modelos no presente estudo foram utilizados como base a modelagem apresentada na literatura [7,12,13,14,17].

O cálculo do balanço hídrico (eq.1) e a quantidade de água no chorume (eq. 2) foi baseado no balanço hídrico do animal e edifício, e a quantidade de água utilizada. O modelo tem em consideração a composição e consumo da ração, o consumo de água, a caracterização dos animais e a temperatura ambiente, obtendo-se como resultados o volume do chorume (gestação e maternidade).

$Água_{(balanço)} = Água_{(consumo)} + Água_{(alimentação)} + Água_{(metabólica)} - Água_{(retida)} - Água_{(evaporada)}$ (eq. 1)

$Água_{(chorume)} = Água_{(balanço)} + Água_{(lavagem)}$ (eq. 2)

Onde $Água_{(chorume)}$ representa a água contida no chorume, $Água_{(lavagem)}$ é a água utilizada na limpeza do edifício, $Água_{(consumo)}$ é a água consumida pelas porcas, $Água_{(alimentação)}$ é a água contida na ração, $Água_{(metabólica)}$ representa a água produzida pelo metabolismo do animal, $Água_{(retida)}$ é a água retida nos seus tecidos e $Água_{(evaporada)}$ é a água evaporada pelos animais. Tanto a $Água_{(balanço)}$ como $Água_{(chorume)}$ são dados em (kg/animal/dia). No caso da maternidade o balanço tem em consideração a água consumida e retida também no corpo dos leitões.

Para a estimativa da quantidade de água evaporada pelas matrizes considerou-se os fluxos metabólicos emitidos pelas fêmeas que, de acordo literatura especializada [18], estes são determinados em função do peso do animal e do ambiente climático. O cálculo base da produção de vapor de água (kg/h) foi realizado com base na quantidade de calor necessária para converter a água na fase líquida para o estado de vapor (eq. 3). Para o cálculo da água evaporada (eq. 11) foram consideradas as equações de calor latente, visto ser esta a forma de calor dissipado pelas matrizes em função da evapotranspiração [18].

$Água_{(evaporada)} = Q_{LAT} / Lv$ (eq. 3)

Onde Lv é o calor latente de vaporização, que tem o valor de 680,6 W/kg, e o Q_{LAT} é deduzida como complemento do calor sensível $Q_{(Sen)}$:

$Q_{LAT} = Q_{(tot)} - Q_{(Sen)}$ (eq. 4)

Onde $Q_{(tot)}$ é o calor total produzido pelas matrizes (e ninhada durante a lactação, na fase de maternidade), sendo dado por:

$Q_{(tot)} = Q_{(tot\ gestação)} + Q_{(tot\ maternidade)} + Q_{(tot\ animal)}$ (eq. 5)

$Q_{(tot\ gestação)} = 4{,}85 \times m^{0,75} + (8x10^{-5} \times p^3) + 76\ Y_2$ (eq. 6)

$Q_{(tot\ maternidade)} = 4{,}85 \times m^{0,75} + 28 \times Y_1$ (eq. 7)

$Y_1 = 3{,}58 \times T^{0,5} \times \exp(-0{,}003 \times T)$ (eq. 8)

$Q_{(tot\ animal)} = 10^{(0,715 - 0,0025t + 0,0211 \times \log10\ m)} \times m$ (eq.9)

$Q_{(tot\ (t))} = Q_{(tot)} \times [1 + 0{,}012 \times (20-t)]$ (eq.10)

Onde Y_2 corresponde ao ganho de peso (0,18 kg/d), o Y_1 é a produção de leite medida em kg/d, o *p* é o número de dias no ciclo, *t* a temperatura no interior do edifício, *m* a massa corporal em kg e *T* o número de dias em lactação. O $Q_{(tot\ animal)}$ corresponde à matriz ou leitão, quando aplicável. A unidade do $Q_{(tot\ (t))}$ é W.

$Água_{(evaporada)} = (Q_{LAT} / Lv) \times 24$ (eq.11)

$Q_{LAT} = Q_{LAT(matriz)} + Q_{LAT(leitões)}$ (eq.12)

$Q_{LAT(leitões)} = -2{,}26 + 0{,}194 \times t + 0{,}0679 \times m - 0{,}0034 \times t \times m$ (eq.13)

$Q_{LAT(matriz)} = Q_{(tot)} \times \{0{,}62 \times [1+0{,}012 \times (20 - t)] - 1{,}15 \times 10^{-10} \times t^6\}$ (eq.14)

Onde o $Q_{LAT\ (matriz)}$ e o $Q_{LAT\ (leitões)}$ corresponde ao calor latente das matrizes e dos leitões, respetivamente, ambos dados em W, o *m* é a massa corporal em kg e o *t* a temperatura no interior do edifício.

A estimativa da produção da água metabólica foi estimada com base no metabolismo oxidativo das fêmeas. De acordo com dados disponíveis na literatura [19] a produção de uma molécula de dióxido de carbono (CO_2) requer uma molécula de água (H_2O) e a produção de uma mole de CO_2 (22,4L) está associada à produção de 0,018 kg de H_2O. Desta forma, a produção de calor gerado pelas porcas permite estimar o total de CO_2 produzido pela respiração animal. Todavia, alguns autores estimaram coeficientes específicos para matrizes e leitões de 0,180 e 0,185 kg água/mol CO_2 [20], respetivamente (eq. 15).

$Água_{(metabólica)} = [Q_{(CO2)} / ((22{,}41 \times 0{,}018))] \times 24$ (eq.15)

$Q_{(CO2)} = Q_{(CO2\ gestação)} + Q_{(CO2\ maternidade)} + Q_{(CO2\ Leitão)}$ (eq.16)

Onde $Água_{(metabólica)}$ é dado em kg/animal, o $Q_{(CO2\ gestação)}$ e o $Q_{(CO2\ maternidade)}$ é igual a 0,180 L/h.W. O $Q_{(tot)}$, e o $Q_{(CO2\ leitão)}$ é igual a 0,185 L/h.W.

A estimativa da retenção de água corporal das matrizes foi realizada tendo em consideração a estimativa de retenção diária total de proteínas corporais (P_{ret}), utilizando os modelos publicados anteriormente [12]. A quantidade de água retida (H_2O_{ret}) nos tecidos corporais é estimada em função da quantidade de proteína retida (eq. 17) [19].

$$Água_{(ret)} = Água_{(corp)} + Água_{(útero)} + Água_{(leitão)} \text{ (eq.17)}$$

$$Água_{(corp)} = 1{,}10 \times 4{,}889 \times (Pret)^{0{,}885} \text{ (eq.18)}$$

$$Água_{(útero)} = 0{,}84 \times (0{,}3 + 1{,}329 \times \text{massa dos leitões}) \text{ (eq.19)}$$

$$Água_{(leitão)} = 0{,}75 \times \text{massa do leitão na fase de desmame (eq.20)}$$

A estimativa do volume de chorume (eq.21) foi determinada com recurso a equações apresentadas na literatura [12,19].

$$V_{(chorume)} = V_{(quantidade\ chorume)} / Densidade_{(chorume)} \text{ (eq.21)}$$

$$V_{(quantidade\ de\ chorume)} = Água_{(chorume)} + QMS_{(chorume)} \text{ (eq.22)}$$

$$Densidade_{(chorume)} = 1000 + 0{,}49 \times MS \text{ (eq.23)}$$

Onde $V_{(chorume)}$ é a quantidade de chorume produzido (L/animal/dia), a $Água_{(chorume)}$ é a quantidade de água contida no chorume produzido (L/dia), o $QMS_{(chorume)}$ a quantidade de matéria seca contida no chorume (kg/animal), a Densidade $_{(chorume)}$ é a densidade do chorume (kg/L) e o MS é a matéria seca do chorume (g/kg).

3. Resultados

3.1. Características dos chorumes analisados

Na Tabela 2 estão representadas as características físico-químicas do chorume analisado.

Tabela 2. Características físico-químicas do chorume (média ± desvio padrão g/L).

Parâmetro	Gestação		Maternidade
	G1	G2	
N.º lotes	14	14	14
Sólidos			
Totais	18,3 ± 16,3	52,7 ± 32,3	14,1 ± 3,9
Voláteis	11,3 ± 11,2	33,6 ± 21,1	8,3 ± 2,6
Minerais	7,0 ± 5,2	19,1 ± 11,7	5,8 ± 1,4
Azoto Total	2,4 ± 0,6	4,6 ± 0,9	3,1 ± 0,9

N – NH_4^+	1,8 ± 0,3	3,1 ± 0,5	2,6 ± 0,8
Potássio Total	0,8 ± 0,2	1,9 ± 0,4	1,3 ± 0,5
Fósforo Total	0,7 ± 0,7	1,5 ± 1,0	0,3 ± 0,2

3.2. Medições de temperatura e humidade

Na Tabela 3 estão representadas as características físico-químicas do chorume analisado no âmbito deste estudo.

Tabela 3. Temperatura média diária (ºC) e Humidade (%) registadas nas explorações.

Parâmetro	Gestação		Maternidade
	G1	G2	
Temperatura	21,6 ± 2,2	21,4 ± 2,3	22,1 ± 2,2
Humidade	75,6 ± 6,7	74,9 ± 6,8	77,1 ± 8,6

3.3. Consumo de água e produção de chorume

A relação do consumo de água com a produção de chorume (L/matriz/d), bem como a média e o desvio padrão, observados nas explorações encontra-se representada na Tabela 4.

Tabela 4. Relação do consumo de água com a produção de chorume (L/matriz/d) e respetivas médias e desvios padrão.

Parâmetro	Gestação		Maternidade
	G1	G2	
N.º Lotes	29	29	26
Consumo de água	27,1 ± 3,9	8,9 ± 2,1	32,2 ± 9,2
Produção de chorume	15,2 ± 3,1	5,7 ± 1,5	18,9 ± 2,4

4. Discussão

As temperaturas críticas máximas situam-se entre os 25 e os 32°C, para as fêmeas gestantes, e entre os 22 e 25°C para fêmeas em lactação [22]. No nosso estudo, as temperaturas médias registadas foram inferiores aos valores considerados como temperatura crítica máxima para matrizes.

Os consumos de água observados para as matrizes foram de: G1: 27,1 ±3,9 (L/d) e G2: 8,9 ± 2,1 (L/d), e na maternidade foram de 32,2 ±9,2 (L/d). Diante do determinado, pode ser indicado que estes valores se encontram dentro dos intervalos observados por diferentes autores (matrizes gestantes: de 10 a 15 L/d e

matrizes em lactação 31 ± 4,9 L/d [23]; matrizes gestantes: de 15 a 20 L/d e matrizes em lactação: de 25 a 35 L/d [24]).

Os valores de volume médio diário de chorume produzido pelas matrizes gestantes foram de 15,2 ± 3,1 L/d (G1) e de 5,7 ± 1,5 L/d (G2), e na maternidade de 18,9 ± 2,4 L(d), verificando-se, também, que estes se encontram dentro dos valores observados por diversos autores (matrizes gestantes: 15,4 L/d e matrizes lactantes: de 16,4 e 21,5 L/d [25]; matrizes gestantes: 21,25 L/d e matrizes lactantes: 40,56 L/d [26]; matrizes gestantes: 20 L/d e matrizes lactantes: de 13 a 27 L/d [24]; matrizes gestantes: 16,0 L/d e matrizes lactantes: 27,0 L/d [6]).

Quanto ao volume total de chorume produzido, as previsões do modelo estão representadas na Figura 1 e na Figura 2.

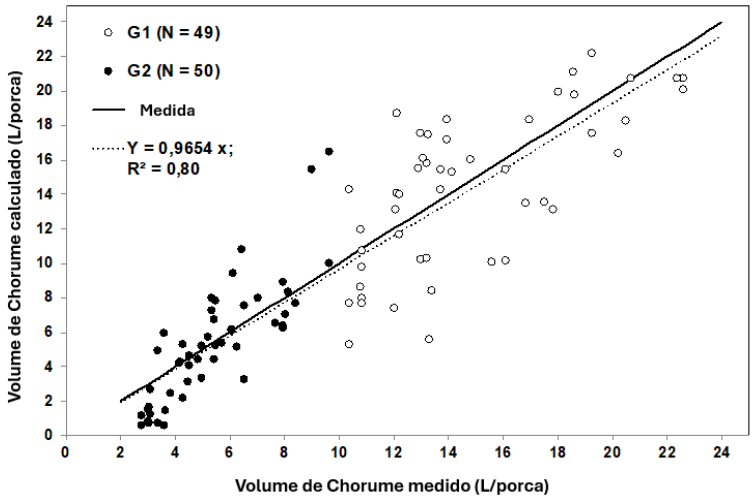


Figura 1. Relação entre o volume de chorume medido em campo e o chorume previsto pelo modelo (gestação).

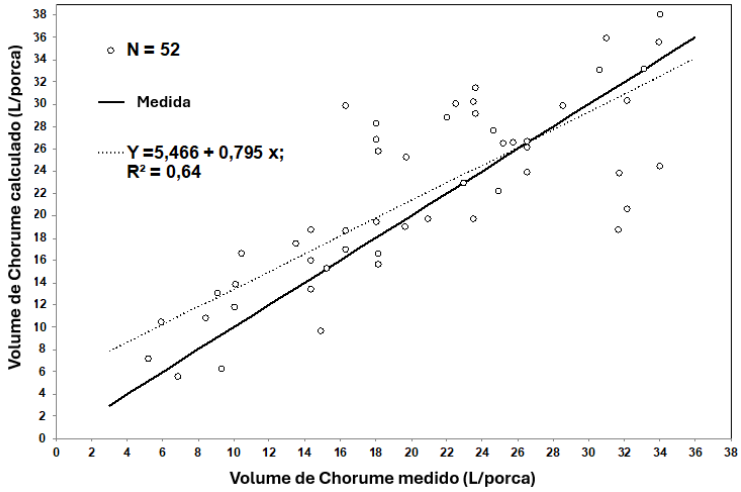


Figura 2. Relação entre o volume de chorume medido em campo e o chorume previsto pelo modelo (maternidade).

As previsões do modelo foram bastantes satisfatórias. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,80 e o erro de previsão foi de 2,79 ± 1,6 L, ou seja, 19 e 32% do valor médio, para G1 e G2, respetivamente. Para a fase da maternidade, embora a relação tenha sido menos precisa comparativamente à fase da gestação, o modelo de previsão também apresentou resultados satisfatórios. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,64 e o erro de previsão foi de 3,9 ± 3,44 L, ou seja, 22,3% do valor médio.

Na Tabela 5 está apresentada a média e o desvio padrão entre os valores previstos e medidos relativamente ao volume de chorume.

Tabela 5. Média e desvio padrão da diferença entre os valores medidos e previstos para o volume de chorume e erro de previsão (% da média medida).

Parâmetro	Balanço (medido e estimado)	Erro de previsão (%)
G1 (L/matriz/d)	2,79 ± 1,73	19,9 ± 13,8
G2 (L/matriz/d)	1,60 ± 1,42	32,0 ± 26,6
Maternidade (L/matriz/d)	3,99 ± 3,44	22,3 ± 19,1

O erro de previsão pode ter ocorrido devido às interferências de diferentes fatores associados à produção nas explorações comerciais (UPD), tais como, a temperatura ambiente, tipo de pavimento, ventilação, entre outros. Além desta situação, há que ter em consideração que o modelo foi desenvolvido, em alguns momentos, com base em relações empíricas.

5. Conclusões

Numa primeira abordagem, considera-se que este modelo é consideravelmente preciso nas estimativas de volume de chorume gerado, principalmente na fase fisiológica de gestação. No entanto, devido aos elevados erros de previsão, considera-se importante a melhoria contínua do presente modelo para as condições de alimentação, ambiente, temperatura e gestão dos animais das explorações do Brasil.

Contribuição dos Autores: Conceptualização: C.A., J.M.R.T., P.B.F., A.C. e P.A.V.d.O.; metodologia: J.M.R.T., A.C. e P.A.V.d.O.; software, J.M.R.T., A.C. e P.A.V.dO; validação: C.A., J.M.R.T. e A.C.; análise formal: C.A., J.M.R.T. e A.C.; investigação, J.M.R.T..; recursos, J.M.R.T., P.B.F. e P.A.V.d.O.; curadoria de dados, J.M.R.T. e A.C.; redação - preparação do projeto original: J.M.R.T.; redação - revisão e edição, C.A., J.M.R.T., P.B.F. e P.A.V.d.O.; visualização, C.A., J.M.R.T., P.B.F., A.C. e P.A.V.d.O.; supervisão, P.B.F., A.C. e P.A.V.d.O.; administração do projeto, P.A.V.d.O.; obtenção de financiamento, J.M.R.T., P.B.F. e P.A.V.d.O. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: O presente estudo foi financiado pela "Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina-FAPESC" (Project Ref.ª FAPESC nº 3706/2013 and Agreement nº 2013TR3968); "Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES"; and "Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico—CNPq".

Agradecimentos: A realização deste estudo foi possível graças às contribuições financeiras da AINCADESC/SINDICARNE-SC, EMBRAPA, Brasil Foods (BRF), FAPESC e PPGEA-UFSC.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesses e os financiadores não tiveram qualquer papel na conceção do estudo, na recolha e na análise ou interpretação dos dados

Referências

1. Kim, S. w., Gormley, A., Jang, K. B., & Duarte, M. E. (2023). Current status of global pig production: an overview and research trends. Animal Bioscience, Volume 4. doi:10.5713/ab.23.0367
2. FAO. (2024). The state of Food and Agriculture 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN:978-92-5-139140-2
3. USDA. (2024). Foreign Agricultural Service: U.S. Department of Agriculture. Disponível online: https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0113000 (acesso em setembro de 2024)
4. Andretta , I., Hickmann, F. M., Remus, A., Franceschi, C. H., Mariani, A. B., Orso, C., Pomar, C. (2021). Environmental Impacts of Pig and Poultry Production: Insights From a Systematic Review. Frontiers in Veterinary Science, Volume 8. doi:10.3389/fvets.2021.750733
5. Rodica, B., Petroman, I., Petroman, C., Gabruta, A., & Marin, D. (2015). Requirements in the Establishment and Exploitation of Pig Farms. Lucrări Ştiiţifice Management Agricol, Volume 17. E-ISSN 2069-2307
6. Ito, M., Guimarães, D., & Amaral, G. (2016). Imapctos ambientais da suinicultura: desafios e oportunidades. Agroindústria(44), pp. 151-156. Disponível online: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9974 (acesso em dezembro de 2024)
7. Tavares, J. M. R. (2016). Modelagem do consumo de água, produção de dejetos e emissão de gases de efeito estufa e amônia na suinicultura. Tese (doutorado) em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível online: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/175847 (acesso em setembro de 2024)
8. Monteiro, A., Wilfart, A., Utzeri, V., Lucac, N., Tomazin, U., Costa, L., Garcia-Launay, F. (2019). Environmental impacts of pig production system using European local breeds: The contribution of carbon sequestration and emissions from grazin. Journal of Cleaner Production, Volume 237. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117843
9. Brito, S. A., Duarte, G. D., Sobral, F. E., & Christoffersen, M. L. (2022). Environmental impacts of swine farming. Environmental Smoke, Volume 5, pp. 1-6. doi:10.32435/envsmoke.2022531-6
10. Yeo, U.-H., Jo, S.-K., Kim, S.-H., Park, D.-H., Jeong, D.-Y., Park, S.-J., Kim, R.-W. (2023). Applicability of Machine-Learned Regression Models to Estimate Internal Air Temperature and CO_2 Concentration of Pig House. Agronomy, Volume 13. doi: https://doi.org/10.3390/agronomy13020328
11. Tavares, J. M. R., Lopes, J. d., Filho, P. B., Coldebella, A., Oliveira, P. A. V. (2023). Water Disappearance and Manure Production at Growing–Finishing Commercial Pig Farms in Brazil—A Simplified Model Approach. Water, Velome 15. doi: https://doi.org/10.3390/w15020278
12. Dourmad, J-Y., Pomar C., Massé, D. (2002). Modélisation du flux de composés à risque pour l'environnement dans un élevage porcin. Journées de la Recherche Procine, Vloume 34, pp. 183-194. Disponível online: https://hal.inrae.fr/hal-02826461v1 (acesso em setembro de 2024)
13. Dourmad, J.-Y., Pomar, C., & Massé, D. (2003). Mathematical modelling of manure production by pig farms. Effect of feeding and housing conditions. Animal, Volume 192, pp. 111-125. Disponível online: https://www.researchgate.net/publication/237473106_MATHEMATICAL_MODELLING_OF_MANURE_PRODUCTION_BY_PIG_FARMS_EFFECT_OF_FEEDING_AND_HOUSING_CONDITIO

NS MODELISATION MATHEMATIQUE DES REJETS EN PRODUCTION PORCINE INFLUENCE DE L'ALIMENTATION ET DU LOGEMENT (acesso em fevereiro de 2025)
14. Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad, J.Y. (2010a). Modelling of manure production by pigs and NH_3, N_2O and CH_4 emissions. Part I: animal excretion and enteric CH_4, effect of feeding and performance. Animal, Volume 4, pp. 1401-1412. doi: https://doi.org/10.1017/S1751731110000492
15. Peng, S., Zhu, J., Liu, Z., Hu, B., Wang, M., & Pu, S. (2022). Prediction of Ammonia Concentration in a Pig House Based on Machine Learning Models and Environmental Parameters. Animals, Volume 13. doi: 10.3390/ani13010165
16. IBGE. (2024). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível online: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=41350&t=destaques (acesso em dezembro de 2024)
17. Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad, J.Y. (2010b). Modelling of manure production by pigs and NH_3, N_2O and CH_4 emissions. Part II: effect of animal housing, manure storage and treatment practices. Animal, Volume 4, pp. 1413-1424. Doi: 10.1017/S1751731110000509
18. CIGR (2002). 4th report of working group on climatization of animal houses heat and moisture production at animal and house levels. Pedersen, S., Sällvik, K. Eds, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark. Disponível online: https://www.cigr.org/sites/default/files/documets/CIGR_4TH_WORK_GR.pdf (acesso em dezembro de 2024)
19. Oliveira P.A.V. (1999). Comparaison des systèmes d'élevage des porcs sur litière de sciure ou caillebotis intégral. Thèse de doctorat, L'ENSAR Rennes, France
20. Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., JØrgensen, H., Chwalibog, A., haeussermann, A., Heetkamp, M., Aarnink, A. (2008). Carbon dioxide production in animal houses: a literature review. Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal, Volume 10, pp. 1-19. Disponível online: https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/1205/1132 (acesso em dezembro de 2024)
21. Oliveira P.A.V., Belli Filho P., Trumina L., Coldebella A., Tavares J.M.R. (2015). Modélisation du volume et de la composition du lisier des porcs à l'engraissement. Journées Rech. Porcine, Volume 47, pp. 153-158. Disponível online: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1033562
22. Quesnel, H., Boulot, S., Le Cozler, Y. (2005). Les variatinos saisonnières des performances de reproduction chez la truie. INRA, Prod. Anim., Volume 18, pp. 101-110. https://doi.org/10.20870/productions-animales.2005.18.2.3513
23. Massabie P., Roy H., Boulestreau-Boulay A.L., Dubois A. (2014). La consommation d´eau en élevage de porcs. Edition IFIP-Institut du porc, Paris, 1º trimester. Disponível online: https://www.aripnormande.fr/assets/files/abreuvement_elevages_porc_ifip.pdf (acesso em novembro de 2024)
24. IFIP. (2013). Mémento de L'éleveur de porc. Institut du Porc. Disponível online: https://ifip.asso.fr/app/uploads/2019/06/00_introduction_memento.pdf (acesso em novembro de 2024)
25. Levasseur P. (1998). Composition et volume de lisier produit par le porc : Données bibliographiques, Techniporc, Volume 21, nº 4.
26. Levasseur P., Texier C., 2001. Teneurs en éléments-trace métalliques des aliments et des lisiers de porcs à l'engrais, de truies et de porcelets. Journées Rech. Porcine, 33, 57-62.

GHG emissions using different methodologies in cashew cultivation

Adriana Correa-Guimaraes[1]Jonnathan Richeds da Silva Sales[1], *Claudivan Feitosa de Lacerda[2], Viviane da Silva Barros[3], Maria Cléa Brito de Figueirêdo[4]

1 Department of Agricultural and Forestry Engineering, EIFAB, University of Valladolid, Soria, Spain. E-mail: adriana.correa@uva.es jonnathanricheds.da-silva24@estudiantes.uva.es

2 Department of Agricultural Engineering, Federal University of Ceará, Fortaleza, CE, Brazil. E-mail: cfeitosa@ufc.br

3 Embrapa Environment, Jaguariúna, SP, Brazil. E-mail: vivianebarros1@hotmail.com

4 Embrapa Tropical Agroindustry, Fortaleza, CE, Brazil. E-mail: clea.figueiredo@embrapa.br

Correspondence: A.C.G. E-mail: adriana.correa@uva.es

Abstract: Quantifying GHG emissions from cashew cultivation, especially in Brazil, is essential to assess the environmental impact and promote the sustainable development of this ac-tivity. The objective of this study was to evaluate and compare methods for quantifying GHG emissions based on empirical equations for life cycle inventories, using the conventional cashew production system in Brazil as a case study. The scope of the study encompasses, from gate to gate in a dwarf cashew production system, considering the production of one ton of cashew as a functional unit. GHG emissions were assessed and compared using the following methodologies: Nemecek-Calc; WFLDB; IPCC-Calc, BR-Calc and Agri-footprint. Environmental assessment followed ISO standards (14040, 14044 and 14067). The results showed that the carbon footprint varied among the evaluated methodologies, with a difference of 24.5% between the highest value (129.5 kg CO_2 eq – IPCC-Calc and BR-Calc) and the lowest (104 kg CO_2 eq – Nemecek-Calc) per ton of cashew. N_2O was the main contributor to emissions, accounting for up to 75.9%, while CO_2 represented up to 25.8%. The choice of methodology is fundamental, as it directly influences the results and interpretation of the carbon footprint in cashew farming, impacting the sustainability of this agricultural activity.

Keywords: *Anacardium occidentale* L; carbon footprint; life cycle assessment

1. Introduction

Given climate change and attention to environmental issues observed in recent years, international food supply chains are increasingly focused on sustainability and reducing environmental impact. In this context, calculating greenhouse gas (GHG) emissions in agricultural production systems and determining possible mitigation points of these gases is paramount [1].

Therefore, there is a need to mitigate the environmental impact of products and make food production more sustainable [2]. Studies on the environmental footprints of agricultural products have become essential tools to assess and improve the efficiency of these chains, as they encompass important environmental impact indicators such as the carbon footprint (CF) [3].

The reduction of CF is attributed to agriculture facilitates reaching internationally established targets to combat climate change by reducing GHG emissions, especially when these studies follow international standards established by the International Standard Organization (ISO), the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and sustainable development goals (SDGs).

Several methodologies have been developed and can be used to calculate GHG emissions related to agricultural production chains. Life cycle assessment (LCA) studies focused on CF cover impact categories of global interest, such as climate change [4, 5].

LCA is a methodology used to investigate potential environmental impacts of producing a product or service according to ISO 14040, 14044 [6, 7]. ISO 14067 [8] details the methodological procedures for conducting CF studies. These studies allow identifying the origin of a product's main impacts, thus enabling the development of agricultural activities with greater environmental sustainability.

Thus, it is essential to use methodologies for quantifying direct GHG emissions from agricultural production. To improve the efficiency of calculating the emissions mentioned above and consequently, the evaluation of the CF of agricultural products, operational tools based on different methodological procedures and/or characterization models are being developed worldwide.

Recently, in Brazil, Embrapa Environment released ICVCalc, a tool designed for building agricultural inventories for LCA studies [9]. This tool consists of a set of spreadsheets that estimate emissions using various methodological protocols, thereby generating comprehensive process inventories. The methodologies used are internationally recognized, such as Nemecek-Calc [10]; World Food LCA Database (WFLDB) [11]; IPCC-Calc [12], BR-Calc [9] and Agri-footprint [13].

Thus, the BR-Calc methodology is an initiative aimed at addressing the need to develop tools that use characterization factors adapted to the reality of tropical climate countries, enabling more accurate estimates of GHG emissions under these conditions. Comparison with international methods can help identify areas for improvement in BR-Calc, such as incorporating best practices from other methodologies or adjusting to better reflect Brazilian conditions. Since concerns

about climate change and sustainability are global, emission estimation methodologies must be internationally comparable.

However, studies evaluating and comparing the estimation of GHG emissions and the impact on the CF of agricultural products are incipient in the literature, especially when it comes to studies conducted for tropical climate regions and crops, such as Brazil and the cashew crop.

Additionally, while various methodologies are available, few studies provide a systematic comparison of their applicability to tropical conditions [14]. As a result, there is still a limited understanding of how different empirical equation-based methods perform in estimating GHG emissions for cashew production in Brazil, considering regional data availability, scientific robustness, and methodological transparency. This gap in the literature justifies the need for a comprehensive assessment of different GHG quantification methods applied to cashew production, ensuring that the chosen approach accurately represents the environmental impacts in this specific context.

Thus, the objective of this study was to evaluate and compare methods for quantifying GHG emissions based on empirical equations for life cycle inventories, using the conventional cashew production system in Brazil as a case study.

2. Materials and Methods

The following methodologies were applied for estimating direct emissions of CO2 and N2O, and CH4: Nemecek-Calc [10]; WFLDB [11]; IPCC-Calc [12], BR-Calc [9] and Agri-footprint [13]. The ICVCalc tool [9] was used to calculate GHG emissions by the chosen methods. It is emphasized that the indirect emissions of NOx, NH_3, and NO_3, which contribute to N_2O emissions, were considered for calculation purposes following the methods suggested by each GHG methodology. However, these emissions are not a focus of evaluation in the present study.

For the evaluation of carbon footprint of cashew production years, the global warming potentials of GHGs in the horizon of 100 years were used, according to [15], evaluating. Each methodology's input data and emissions were evaluated using software Simapro ® version 9.5.0.0.

Primary and experimental data were used to develop an inventory of GHG emissions for the conventional dwarf cashew crop production in Brazil, made available by Embrapa Tropical Agroindustry and complemented by [16].

The production of one ton of cashew nut + apple was considered a functional unit, corresponding to the cultivation of one hectare of the Embrapa dwarf cashew production system, evaluated over 25 years of cultivation. This period represents the typical lifespan of a dwarf cashew orchard, including the following production stages: establishment (including soil preparation and seedling transplantation during the 1st year), active growth (from the 2th to the 6th year) and full production (from the 7th to the 25th year). The seedling production stage was not considered due to its insignificant contribution to the results, as noted by [4].

The information taken into consideration for the preparation of the inventory of the Embrapa dwarf cashew production system was based on experimental data (considering a field experiment, 15 years old) and documents from [4, 15]. The BRS 226 clone, recommended for dryland cultivation in environments with hot climate conditions, low rainfall and deep, sandy soils, was considered as the genetic material evaluated [17]. The study covers the following steps:

Establishment (Year 1): After cleaning the area, soil preparation begins by harrowing, correcting soil acidity with limestone and digging planting holes measuring 40 x 40 x 40 cm. Currently, fertilization is carried out with fertilizers containing macro and micronutrients. 30 days after preparing the holes, the grafted cashew seedlings are transplanted, spaced 8 x 6 m apart, corresponding to a stand of 208 plants per ha. Irrigation is only used at this stage and is intended to save the seedlings during the dry season (6 months).

Active growth (Years 2–6): Dwarf cashew plants grow actively until the sixth year, with slow development in the rainy season and intense development in the dry season. At this stage, formation fertilization begins, fertilizing with nitrogen (urea), phosphate (simple superphosphate) and potassium fertilizers (potassium chloride) and micronutrients (FTE BR-12). During this period begins formation pruning, aiming to form a compact, well-lit and airy crown. Pest, disease and weed management is carried out simultaneously.

Full Production (Years 7–25): In full production, the cashew tree cultivated in the Embrapa system reaches up to 4 m in height, with an estimated average productivity of 2500 kg/ha/year of nuts. At this stage, the use of mineral fertilization with macro and micronutrients is carried out intensively. Similarly, annual cleaning and maintenance pruning, as well as the application of phytosanitary products and mechanized weddings, are carried out.

3. Results

The quantification of carbon dioxide (CO_2) emissions assessed by different methodologies presented variable results (Table 1). IPCC-Calc and BR-Calc generated the same and highest results (397 kg of CO_2/ha), while the Nemecek-Calc and Agri-footprint methodologies were, respectively, 24.7 and 41.3% lower when comparing both situations.

Table 1. Quantification of CO_2 emissions to air in dwarf cashew production system.

CO_2 emissions to air	Unit	Dwarf cashew production system
		Total value for 25 years
Nemecek-Calc	kg	299
WFLDB	kg	392
IPCC-Calc	kg	397
BR-Calc	kg	397
Agri-footprint	kg	233

Table 2 presents the results for nitrous oxide (N_2O) emissions, highlighting notable variations among the methodologies. The highest absolute emissions were observed in the IPCC-Calc and BR-Calc methodologies, both yielding 4.17 kg of N_2O per ha. In comparison, the Agri-footprint methodology showed a slight decrease of 1.44%, while WFLDB and Nemecek-Calc exhibited more substantial reductions of 9.4% and 17.5%, respectively.

Table 2. Quantification of N_2O emissions to air in dwarf cashew production system.

N_2O emissions to air	Unit	Dwarf cashew production system
		Total value for 25 years
Nemecek-Calc	Kg	3.44
WFLDB	Kg	3.78
IPCC-Calc	Kg	4.17
BR-Calc	Kg	4.17
Agri-footprint	Kg	4.11

Emissions of methane gas (CH_4) (Table 3) were quantified by only two of the five methodologies evaluated. Since only the IPCC-Calc and BR-Calc methodologies account for emissions from diesel combustion, a pattern is noted in the CH_4 emissions results, in which both methodologies presented the same result (0.01 kg of CH_4/ha).

Table 3. Quantification of CH_4 emissions to air in dwarf cashew production system

CH_4 emissions to air	Unit	Dwarf cashew production system
		Total value for 25 years
Nemecek-Calc	kg	Not applicable
WFLDB	kg	Not applicable
IPCC-Calc	kg	0.01
BR-Calc	kg	0.01
Agri-footprint	kg	Not applicable

Figure 1 illustrates the impact of GHG emissions on climate change as calculated using different methodologies. The IPCC-Calc and BR-Calc methodologies presented the highest cumulative values (129.5 kg CO_2 eq per t of cashew nut + apple). In contrast, Agrifootprint and Nemecek-Calc presented the lowest 114 and 104 kg CO_2 eq per t of cashew nuts, respectively. The WFLDB methodology presented intermediate results (120 kg CO_2 eq per t of cashew nut + apple). It was found that, for all the evaluated method-ologies, the largest contributions to climate change resulted from the global warming potential of N_2O, reaching up to 75.9%, while CO_2 emissions contributed up to 25.8% of the impact on climate change.

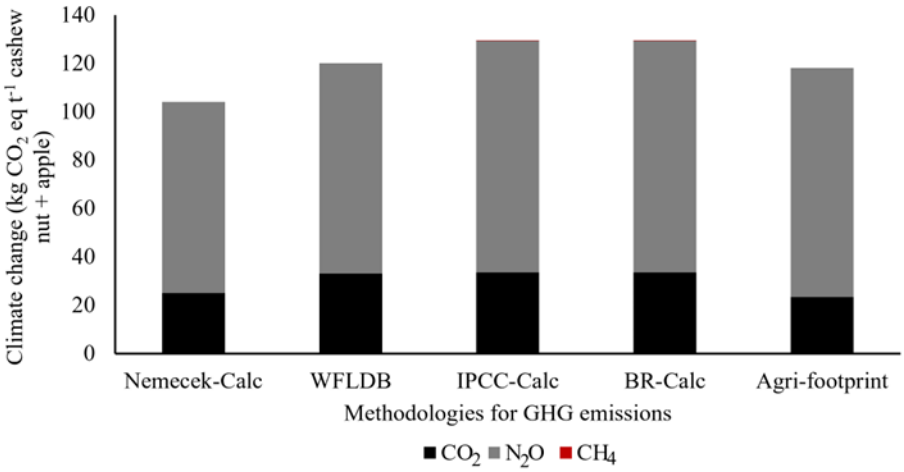


Figure 2. Impact of GHG emissions methodologies on climate change.

4. Discussion

The comparison highlights substantial variations in emission estimates produced by each methodology. These discrepancies underscore the influence of methodological choices on the results obtained, consequently affecting the projected impact of

emissions on climate change. This emphasizes the importance of selecting appropriate methods for accurate assessments.

CO_2 emissions (Table 1) are related to the use of urea, limestone ($CaCO_3$) and dolomite ($(CaMg)CO_3$). Urea application leads to the release of CO_2 previously fixed in the fertilizer molecule. This occurs due to urea hydrolysis, where the carbon in its structure is converted into CO_2. Since approximately 20% of urea's mass consists of carbon, applying the stoichiometric conversion to CO_2 (44/12) results in an estimated emission of CO_2 per kg of urea. On the other hand, the carbonates in limestone and dolomite decompose in the soil, releasing CO_2. In the case of limestone, about 12% of its mass is carbon, while in dolomite, this proportion is approximately 13%.

The IPCC-Calc [12] and BR-Calc [9] methodologies produced identical results as they accounted for urea and limestone emissions, using the same emission factors (0.12 for limestone and 0.20 for urea) and additionally included emissions from fossil fuel (diesel) combustion. The Nemecek-Calc [10] estimated lower emissions because it did not consider limestone and dolomite emissions, whereas the WFLDB [11] reported higher values due to the full accounting of carbon emissions from these inputs. The Agri-footprint methodology [13], despite using the same emission factors for urea and limestone, did not include diesel combustion emissions, leading to different results from those of IPCC-Calc and BR-Calc [9, 12]. Consequently, the inclusion of diesel emissions in IPCC-Calc and BR-Calc [9, 12] significantly increased CO_2 emissions and, therefore, the carbon footprint (Figure 1).

N_2O emissions were estimated in all methodologies considering direct and indirect emissions, as proposed by based on [24]. Direct N_2O emissions are from the use of mineral and organic fertilizers, decomposition of crop residues and mineralization associated with loss of soil organic matter resulting from change of land use or management of mineral soils.

Indirect emissions regard the conversion of NH_3, NOx and NO_3^- into N_2O). However, differences were found in the methodologies regarding emission sources and factors. The lowest emission of N_2O was obtained using the methodology of Nemecek-Calc [10] due to disregarding the mineralization of soil organic matter (Nsom) and the indirect emission from NOx. WFLDB [11] adopts equations with modifications and factors considering direct emissions from fertilizer applications (mineral and organic), crop residues and decomposition of soil organic matter, as well as indirect emissions from NH_3 volatilization, NO_3 leaching and NOx emissions. On the other hand, the highest N_2O values were from IPCC-Calc and BR-Calc [9, 12],

justified by the greater specificity of the equation (Tier 2) for N_2O emissions and by the lack of both considering nitrous oxide emissions from diesel combustion [9, 12].

Considering the carbon footprint results obtained from each methodology, IPCC-Calc and BR-Calc [9, 12] showed the highest impacts. This is because, in addition to fossil CO_2 and N_2O emissions, these methodologies account for additional GHG emissions resulting from diesel combustion, a criterion not evaluated by the other methodologies. Even without evaluating emissions from burning diesel, the WFLDB methodology [11] showed a lower level of only 9.8% in relation to the greater impact, justifying the fact that this method uses a greater emission factor for urea, directly contributing to the impact on climate change.

Nitrogen fertilization directly contributes to the increase in the carbon footprint, where urea, the main fertilizer source of N, increases CO_2 emissions due to its synthesis from ammonia and CO_2, increasing GHG emissions by about 40% due to its high carbon content [25].

BR-Calc [9] is inserted as a regional alternative adapted to Brazilian conditions, seeking to fill gaps left by global methodologies such as the IPCC [12] and more detailed models, such as the WFLDB [11], incorporating emission factors and parameters adjusted to climatic, soil, and agricultural management particularities in Brazil, making it especially relevant for local and regional studies [2]. It is also noteworthy that BR-Calc [9] also calculates emissions other than GHG-related ones, such as heavy metals and phosphate emissions.

When the methodologies of Nemecek-Calc [10] and Agri-footprint [13] were used for the quantification of GHGs, lower values of environmental impact were obtained in the climate change category. This result occurred mainly due to the simplification of calculation present in these methodologies, especially in Nemecek-Calc [10], which presented underestimated results for most of the quantified emissions (Figure 2).

Currently, the most frequently used methodologies for estimating GHG emissions from agricultural systems in LCA studies are those adopted by the IPCC-Calc [12] and the WFLDB [11], especially the joint use of both, according to [18] and [19].

It is important to stress that more specific models such as BR-Calc [9] and Agri-footprint [13], although they allow the estimation of emissions within a limited time and with a small financial budget, require knowledge of local ecosystems to calibrate specific variables for the correct modeling [4].

Based on the IPCC Guidelines [12], the IPCC-Calc quantifies only greenhouse gas emissions, considering N_2O from fertilizers and crop residues and CO_2 from limestone and urea application. However, this methodology has limitations that may affect comparisons with other methods, as it does not include the indirect formation of NO_2, the radiative forcing of NO_x, water vapor, and sulfates, nor the indirect effects proposed by the IPCC, which may underestimate climate impacts. Additionally, it does not account for the conversion of CO-to-CO_2, a relevant factor under certain agricultural conditions [20].

The BR-Calc [9] corresponds to a protocol developed by Embrapa Environment, which compiles methods consolidated in the literature for estimating emissions from agricultural activities, selected for better representing tropical conditions. Additionally, the tool includes a climate and soil database specific to Brazil, allowing users to choose the most suitable geographical scale for their study. However, this protocol uses the same equations and emission factors as the IPCC-Calc for GHG emission quantification, resulting in little mathematical differentiation between the methods. Therefore, future studies should focus on developing GHG emission factors adapted to Brazil's edaphoclimatic conditions to improve estimation accuracy.

In the Nemecek-Calc [10] methodology, a significant underestimation of GHG emissions is observed, mainly due to the absence of accounting for fossil CO_2 from limestone use, nitrogen mineralization in mineral soils, and the exclusion of indirect emissions of (NOx) which, according to the authors, correspond to 21% of N2O emissions. Additionally, this methodology features poorly explained equations and factors that are difficult to understand, compromising the clarity and transparency of the calculations.

The WFLDB [11] methodology is an update of the method by Nemecek and Schnetzer (2012), correcting most of the issues of its predecessor by providing greater data transparency and enhanced scientific robustness. However, in both methodologies, GHG emissions from fossil fuel combustion are not accounted for, which limits the accuracy of the estimates.

5. Conclusions

This study contributes to the advancement of LCA and CF in tropical regions by addressing the gap in methodological comparisons highlighted in the work. By evaluating different approaches to quantifying GHG in a tropical agricultural system, our results highlight the importance of choosing methodologies that can be adapted to different agricultural scenarios.

The choice methodology for estimating GHG emissions is a critical factor, as it directly influences the interpretation of agricultural carbon footprints. In this study, the IPCC-Calc and BR-Calc methodologies yielded the highest emission estimates for cashew production under tropical conditions, leading to the largest carbon footprints. In contrast, the Nemecek-Calc methodology reported the lowest values, highlighting the variability among methods and the need for regionally adapted approaches.

Author Contributions: Conceptualization, J.R.S.S. and A.C.G.; methodology, J.R.S.S, ACG and V.S.B.; software, M.C.B.F.; validation, C.F.L., M.C.B.F. and A.C.G.; formal analysis, V.S.B. and ACG; investigation, J.R.S.S and A.C.G.; resources, M.C.B.F.; data curation, J.R.S.S and V.S.B.; writing—original draft preparation, J.R.S.S and A.C.G.; writing—review and editing, J.R.S.S, V.S.B C.F.L, M.C.B.F and A.C.G..; visualization, V.S.B, A.C.G..; supervision, C.F.L and A.C.G..; project administration, M.C.B.F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement: The data used for the work are available upon request to the corresponding author.

Acknowledgments: Coordination for the improvement of higher education personnel (CAPES), notice 06/2024. The Embrapa Tropical Agroindustry.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Poore, J.; Nemecek, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* **2018**, *360*, 987–992.
2. Giongo, V.; Acosta, A.S.; Dossa, A.A.; Santi, A.; Amaral, A.J.; Caierao, E.; Denardin, J.E.; Vieira, O.V.; Figueiredo, M.C.B.; et al. How can the environmental impacts of wheat cultivation and wheat flour production be reduced? A life cycle assessment of Brazilian wheat. *J. Clean. Prod.* **2025**, 144650.
3. Sampaio, A.P.C.; Silva, A.K.P.; Amorim, J.R.A.; Santiago, A.D.; Miranda, F.R.; Barros, V.S.; Sales, M.C.L.; Figueirêdo, M.C.B. Reducing the carbon and water footprints of Brazilian green coconut. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2021**, *26*, 707–723.
4. Figueirêdo, M.C.B.; Potting, J.; Serrano, L.A.L.; Bezerra, M.A.; Barros, V.S.; Gondim, R.S.; Nemecek, T. Environmental assessment of tropical perennial crops: the case of the Brazilian cashew. *J. Clean. Prod.* **2016**, *112*, 131–140.
5. Barros, V.S.; Santos, T.L.; Silva, E.O.; Sousa, J.A.; Figueiredo, M.C.B. Agronomic and Environmental Performance of Melon Produced In The Brazilian Semiarid Region. *Rev. Caatinga* **2019**, *32*, 877–888.
6. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*; ISO: Geneva, Switzerland, **2006a**.
7. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 14044: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*; ISO: Geneva, Switzerland, **2006b**.
8. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 14067: Greenhouse Gases—Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantification and Communication*; ISO: Geneva, Switzerland, **2018**.
9. Matsuura, M.I.S.F.; Cardoso, F.H.; Pighinelli, A.L.M.T.; Ramos, N.P.; Maciel, V.G.; Garofalo, D.T.; Novaes, R.M.L.; Morandi, M. *Workbook for Life Cycle Inventories of Agricultural Products, According to Different Methodological Guides*; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: Jaguariúna, Brazil, **2022**.

10. Nemecek, T.; Schnetzer, J. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. *Zurich, Data v3.0*, **2012**.
11. Nemecek, T.; Bengoa, X.; Lanche, J.; Roesch, A.; Faist-Emmenegger, M.; Rossi, V.; Humbert, S. *Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products*. Version 3.5, December 2019; World Food LCA Database (WFLDB); Quantis and Agroscope: Lausanne and Zurich, Switzerland, **2019**.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*; IPCC: Switzerland, **2019**.
13. Blonk, H.; Van Paassen, M.; Draijer, N.; Tyszler, M.; Braconi, N.; Van Rijn, J. *Agri-footprint 6 and Agri-footprint FLAG Methodology Report*. Gouda, The Netherlands, 2023. Available online: https://blonksustainability.nl/tools-and-databases/agri-footprint (accessed on 6 January 2025).
14. Basset-Mens, C.; Avadí, Á.; Bessou, C.; Acosta-Alba, I.; Biard, Y.; Payen, S. State of the art of agri-food LCA. In *Life Cycle Assessment of Agri-Food Systems: An Operational Guide Dedicated to Developing and Emerging Economies*; Basset-Mens, C., Avadí, Á., Bessou, C., Acosta-Alba, I., Biard, Y., Payen, S., Eds.; Quae: Versailles, France, **2022**; Volume 5, pp. 29–41.
15. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** *AR6 Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability*; IPCC: Suíça, **2021**, p. 38.
16. **Serrano, L.A.L.** *Sistema de Produção do Caju*, 2ª ed.; Embrapa Agroindústria Tropical: Fortaleza, Brasil**, 2016**; 193 p.
17. **Melo, D.S.; Vidal Neto, F.C.; Barros, L.M.** Cultivares recomendadas de cajueiro. In: *Sistema de Produção do Caju*, 2ª ed.; Serrano, L.A.L., Ed.; Embrapa Agroindústria Tropical: Fortaleza, Brasil, **2016**; pp. 193.
18. Lima, A.F.S.; Barros, V.S.; Silva, A.O.; Gondim, R.S.; Figueirêdo, M.C.B.; Costa, R.N.T.; Lacerda, C.F.; Sales, J.R.S.; Silva, Ê.F.F. Carbon and water scarcity footprints of banana under current and future climate conditions in the Brazilian semiarid region. *Environ. Dev.* **2024**, *51*, 101034.
19. **Subedi, S.; Dent, B.; Adhikari, R.** The carbon footprint of fruits: A systematic review from a life cycle perspective. *Sustainable Prod. Consum.* **2024**, *52*, p. 12-28.
20. Fernández-Coppel, I. A.; Barbosa-Evaristo, A.; Corrêa-Guimarães, A.; Martín-Gil, J.; Navas-Gracia, L. M.; Martín-Ramos, P. Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. *Industrial Crops and Products*. **2018**, *125*, p. 556-566.

An Evaluation on Potential Social Impacts of Circular Agriculture: A Social LCA Approach

Israel Dunmade[1,*]

[1] Department of Earth & Environmental Sciences, Mount Royal University, Calgary, Canada; idunmade@mtroyal.ca

* Correspondence: Israel_dunmade@yahoo.ca

Abstract: Agri-industrial sector has a lot of potential for both positive and negative environmental and social impacts. The kind and degree of impact depends to a large extent on geographical, cultural and other factors. This study examined the Nigerian Agri-industrial situation and developed a conceptual circular business model for the industry. Circular economy has been identified as a good alternative to the traditional economic model of extract, manufacture, use and dispose of. Using the United Nations Environmental Protection (UNEP) Guidelines on Social Lifecycle Assessment (sLCA) of products and UNEP/SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) methodological sheets for subcategories of Social life cycle assessment (sLCA), we analyzed the potential socioeconomic impact of implementing circular economy model in the Nigerian Agri-industrial sector. The multilevel simple additive method based sLCA method evaluated seven dimensions of wellness impacts of the industry on various categories of stakeholders. Results showed that Nigerian Agri-industrial sector's workers would benefit economically from the adoption of circular economy principles in the industry. It also showed that workers will also benefit significantly from the resulting improved working environment and social wellbeing. Furthermore, implementation of a circular economy in the sector would foster innovations and result in the opening of new business opportunities, elimination or reduction in environmental pollution, reduction in operating costs, and improved profits for the actors along the value chain. Consequently, these would result in the overall reduction in the industry's ecological footprint, improved standard of living for workers, responsible consumption and production, and facilitate attainment of sustainable development goals.

Keywords: Agri-circular Economy; Circular Agriculture; Social Lifecycle Assessment; Sustainable Development

1. Introduction

Nigeria’s agricultural sector, although primarily made up of subsistence farming, plays a crucial role in the economy, contributing significantly to the GDP and employing a large portion of the population. The country produces a diverse range of crops, including root crops such as cassava, yam, and taro; grains and legumes like sorghum, millet, cowpeas, and maize; as well as other crops such as cashew, oranges, mangoes, various vegetables, palm oil, cocoa beans, and other cash crops.

These crops are harvested throughout different times and seasons of the year. However, a significant portion of them is lost due to operational challenges, including inadequate processing, marketing, storage, and infrastructure, particularly in the regions where they are produced. Similarly, various types of livestock, including chickens, turkeys, cattle, sheep, pigs, fish, and goats, are raised in large numbers across different geographical regions of Nigeria. These animals are often harvested, slaughtered, cooked, and consumed by the owner or their family for food, sold at local markets for cash, or bought, processed, and packaged by large-scale marketers [1–3].

The lifecycle of Nigeria's agri-food sector, like in many countries, is predominantly linear (Figure 1), whether it involves crop farming, livestock production, or food processing. Crop farming generally involves land clearing, ploughing, seed planting, fertilizer application, weed control, harvesting, marketing, and consumption, with waste generation and disposal occurring at various stages. Similarly there are losses at various stages in livestock farming and food processing stages. This traditional approach to production and consumption has led to considerable waste, resource depletion, and environmental pollution, contributing to serious human health issues and ecosystem degradation [4-10]. Acknowledging the unsustainability of this model, the concept of a circular economy has emerged, promoting more sustainable practices aimed at closing the resource cycle and optimizing resource use (Figure 2) [11-16].

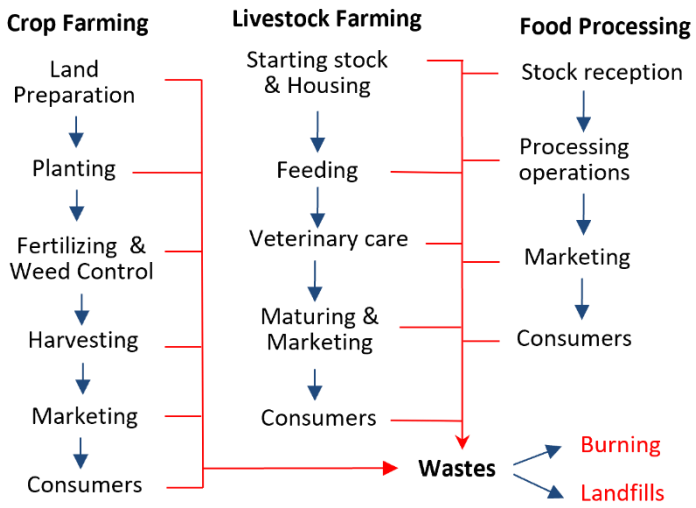


Figure 1. An illustration of a typical linear agricultural lifecycle

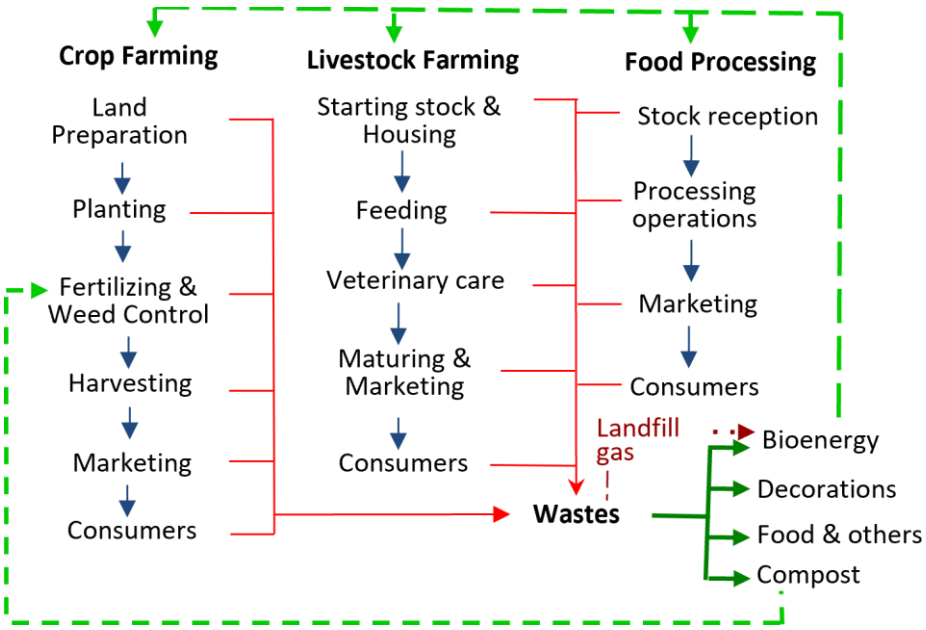


Figure 2. An illustration on possible circular agricultural lifecycle

While the rapid development and adoption of the circular economy model in the agri-food sector hold significant economic, social, and environmental potential, it also presents notable socio-economic implications that remain largely unassessed, especially in the Nigeria context [8, 17-19]. This study aims to fill the gap by evaluating the potential socio-economic impacts of adopting the circular economy concept in Nigeria's agricultural sector, with the goal of identifying hotspots in the lifecycle and articulating steps that could be taken to minimize negative outcomes while enhancing the positive benefits. Consequently, the outcomes should lead to an overall improvement in environmental health, better standard of living for the stakeholders (especially workers), responsible consumption and production, and progression towards the attainment of sustainable development goals.

2. Materials and Methods

Social lifecycle assessment (sLCA) is a lifecycle-based tool designed to evaluate the social impacts and implications of goods and services [20-22]. It does not only assess the social and sociological aspects of products, it also evaluates their actual and potential positive and negative impacts throughout a product or system's lifecycle. The four-step ISO 14044-based socio-economic lifecycle analysis (sLCA) framework (Figure 3) was used to assess the potential impacts of implementing a circular economy in Nigeria's agricultural sector. This method was chosen after a literature review due to its suitability and robust capability to capture the potential effects of the sector on various stakeholders [20-32].

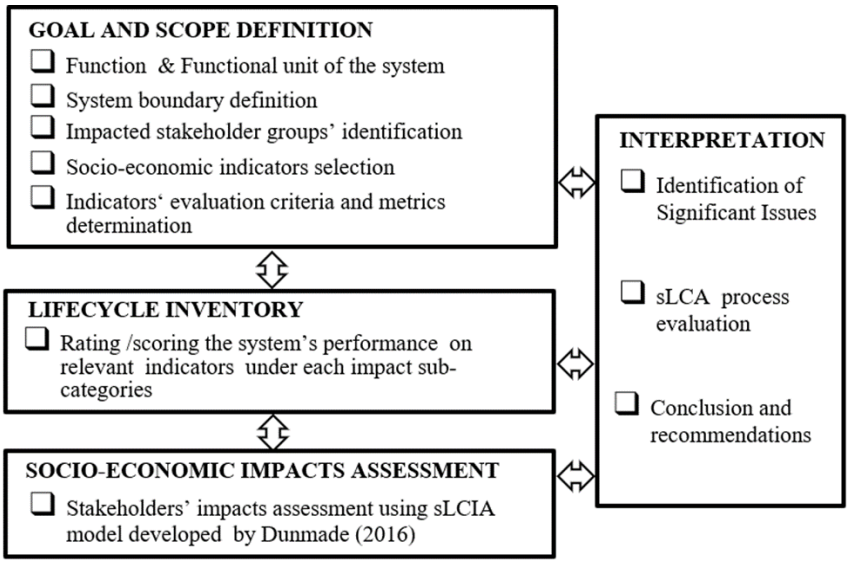


Figure 3. A Social Lifecycle Assessment process [29]

Following the selection of sLCA as the preferred method, each of the listed steps were undertaken: defining the function and functional unit, compiling relevant socio-economic indicators, and developing a scoring metric. The necessary data was then collected and analyzed using the hybridized sLCA approach, which integrated the UNEP Guidelines on Social Lifecycle Assessment (sLCA) of products, UNEP SETAC methodological sheets for subcategories of Social Life Cycle Assessment, and the SiMSAW model developed by Dunmade et al. [34] and UNEP [24, 28-43]. Figure 4 is an illustration of some socio-economic indicators considered under each of the five stakeholder categories.

The SiMSAW Model is a simple additive weighting methodology developed for assessing the sustainability of systems. It enables the evaluation of systems at multiple levels. For this study, the analysis was conducted at three levels. The first level involves the compilation stage, where linguistic lifecycle inventory data is converted into numerical values. This is done by multiplying the probability of certain issues or events occurring with the expected severity of their impact (Table 1). Table 1 also shows how linguistic probability and severity of impact is converted into numerical values while Table 2 shows a sample of linguistic lifecycle inventory of social indicator data collected for the workers (which is one of the five stakeholders categories evaluated in social lifecycle assessments).

Table 1. Indices for evaluating probability of occurrence and severity of impact of each social indicator

Probab. of Occurrence	Rating
No (impossible)	0
Unlikely	2.5
May be	5
Likely	7.5
Yes (Certain)	10

Severity of Impact	Rating
Extremely High (EH)	10
Very High (VH)	8.34
High (H)	6.67
Average/Moderate (AV)	5
Low (L)	3.34
Very Low (VL)	1.67
Non existent (N)	0

The second level represents the initial aggregation of the net impacts of social indicators within each impact category (equation 1). The third level involves compilation of all the social indicators within an impact category and normalizing them to obtain dimensional social impact of the system on a stakeholder group (equation 2) while the fourth stage is the overall social wellbeing impact of the system on the stakeholder group (equation 3).

This study was focused on the macro-level implementation of circular agriculture, specifically at the national level. As such, only four out of the five evaluation categories are considered relevant: the impacts of circular agriculture on workers, consumers, value chain actors/businesses, and Nigerian society as a whole. The impacts on local communities are excluded, as they are better assessed at the micro and meso levels.

The net dimensional socio-economic indicator value (J_i) for stakeholder category i can then be mathematically expressed as:

$$J_i = [P_{ik}(S_{ik})]_{+ve} + [P_{ik}(S_{ik})]_{-ve} \quad \text{.....(1)}$$

where i refers to a specific stakeholder category such as workers, local community, consumers, value chain actors, etc.

P_{ik} is the probability of social issue k occurring/affecting stakeholder category i

S_{ik} is the estimated severity of impact of social issue k on stakeholder category i, if it ever affect him/her

+ve and -ve is an indication of whether a social issue k is/have positive or negative impact on the stakeholder i

The normalized criteria/dimensional well-being score (T_i) for the stakeholder category i is then defined as

$$T_i = \left[\frac{1}{n}\sum_{n=1}^{N} \quad J_n\right]_i \qquad \text{..... (2)}$$

where n is the number of socio-economic indicators that are relevant to stakeholder i considered in the study.

The overall socio-economic impact (Y_i) of the agricultural sector on the stakeholder i can be expressed as

$$Y_i = [T_{ECW} + T_{PHW} + T_{EMW} + T_{ITW} + T_{SOW} + T_{SPW} + T_{ENW}]_i \qquad \text{..... (3)}$$

where ECW stands for economic well-being, while PHW, EMW, ITW, SOW, SPW, and ENW stand for physical well-being, emotional well-being, intellectual well-being, social well-being, spiritual well-being, and environmental well-being, respectively

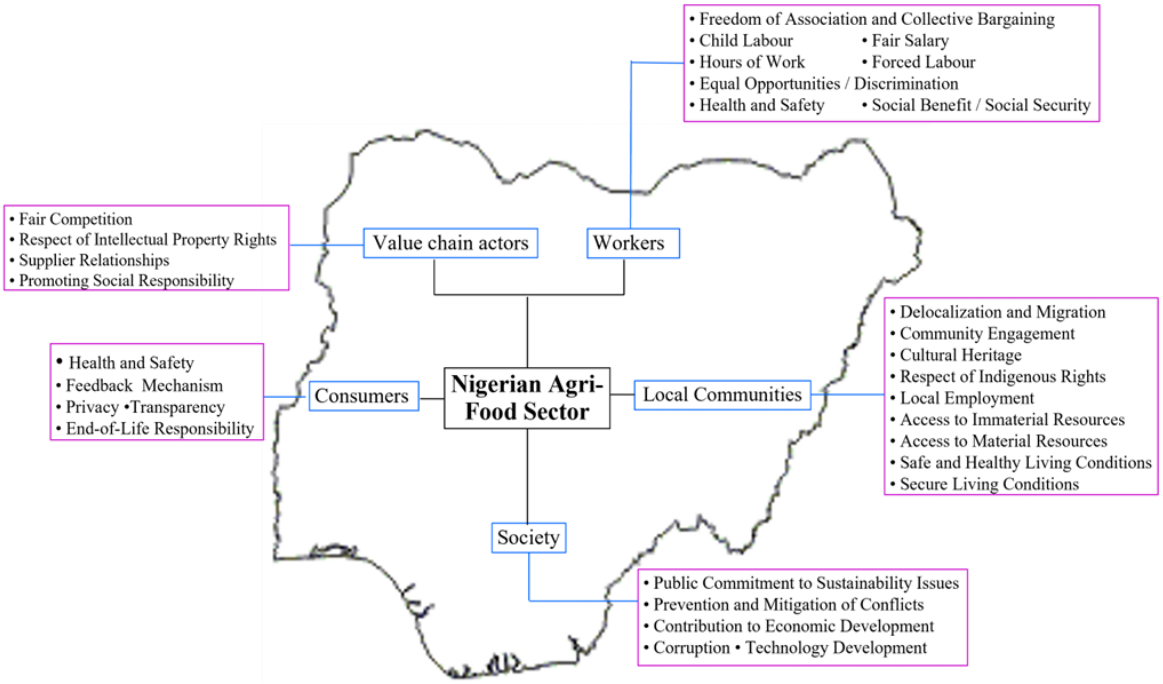


Figure 4. Nigerian Agricultural sector's socio-economic impact indicators and stakeholder categories [29]

2.1 Goal and Scope of the Study

The goal of the study is to determine the potential impact of the Nigerian agricultural sector so that policy makers at the Local, State and Federal Government levels can see areas requiring changes along the system's lifecycle and thereby take appropriate actions that would lead to improvements in socio-economic wellbeing of the stakeholders. The functional unit of assessment in this study is the net impact of social indicators on the wellbeing of individual stakeholder categories involved in or affected by Nigeria's agri-food sector (Ashton and Jones, n.d.). This is represented as a dimensionless numerical value, with a maximum utility value of 1. The scope of

the analysis is confined to Nigeria as the geographical boundary, while the lifecycle boundary encompasses all agri-food activities carried out by stakeholders, from land clearing to end-of-life stage of the lifecycle. The following section presents the results of the analyses, highlighting the potential socio-economic impacts of implementing Circular Agriculture in Nigeria on various stakeholder categories.

3. Results

Results of the study consists of the data compiled in the Lifecycle Inventory (Tables 3 and 4) and the Lifecycle Impact for the stakeholder groups analyzed. Figures 5-8 illustrate the potential impacts of implementing circular economy principles in the Nigerian agriculture industry on workers, consumers, value chain actors, and the society at large.

3.1 Social Lifecycle Inventory Results

Table 2. A sample of linguistic lifecycle inventory for the workers' stakeholder category

Criteria/ Dimension	**Socioeconomic indicator**	**Positives**		**Negatives**	
		Probab.	Severity	Probab.	Severity
Economic Wellbeing	Employ opportunities	Yes	EH		
	Career growth opportunity	Yes	EH		
	Household income	Yes	EH/VH		
	Essentiality affordability	Likely	AV		
	Labour mobility	Likely	AV		
Physical Wellbeing	Occupational injury			May be	H/AV
	Risk of catastrophe			May be	AV
	Health	Yes			
Emotional Wellbeing	Socialization	Likely	H		
	Occupational injury			May be	H/AV

Table 3. The sample lifecycle inventory converted to numerical values

Criteria/ Dimensions	Positives			Negatives			Normalized Dimensional WB
	Probability	Severity	Normalized +ve Social Indicator result	Probability	Severity	Normalized -ve Social Indicator result	
Economic WB	1	1	1				
	1	1	1				
	1	0.917	0.917				
	0.75	0.5	0.375				
	0.75	0.5	0.375				**0.7334**
Physical WB	1	0.5	0.5	0.5	0.5835	0.29175	
			0.5	0.5	0.5	0.25	**-0.04175**
Emotional WB	0.75	0.667	0.50025				
				0.5	0.5835	0.29175	**0.2085**

3.2. Social Lifecycle Impact Analysis Results

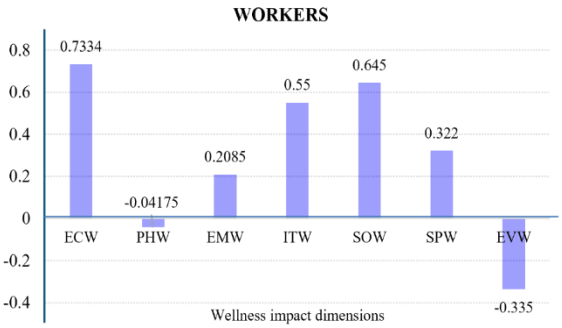


Figure 5. Dimensional social impacts on Workers

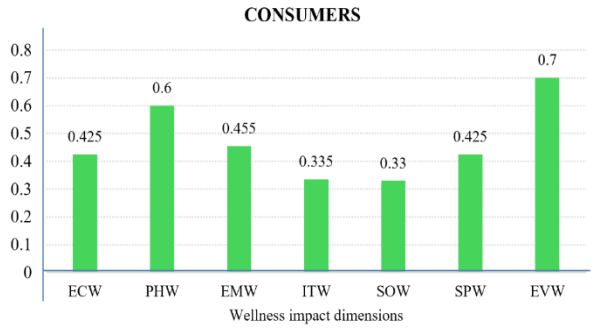


Figure 6. Dimensional social impacts on Consumers

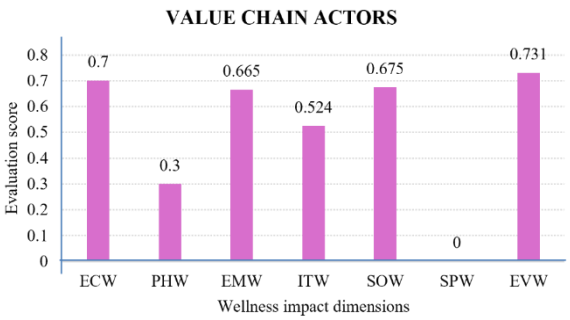


Figure 7. Dimensional social impacts on Value Chain

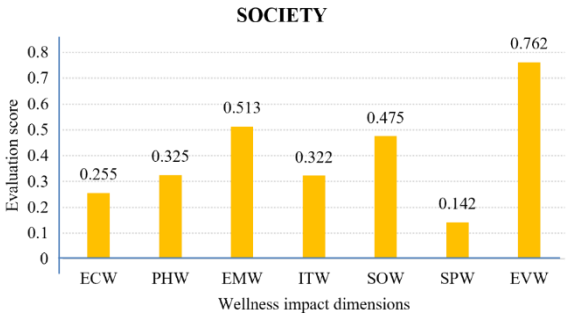


Figure 8. Dimensional social impacts on the Society

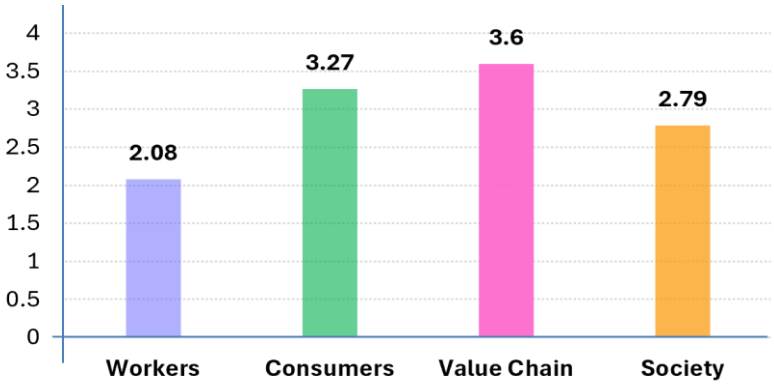


Figure 9. The overall social impacts of the Nigeria's Agricultural Sector on each Stakeholder Group

4. Discussion

The results in Figure 5 showed that workers in the Nigerian agricultural industry would benefit economically from adopting the circular economy principles. Furthermore, workers would experience significant improvements in their working environment and social well-being. However, the implementation of circularity would have a slight negative impact on workers' physical well-being due to the potential stress associated with training for new processes and some environmental issues, particularly in the initial stages, due to exposure to changes in the new work situation and environment. It is also anticipated that implementation of the circular economy concept in the sector will have a moderate positive impact on workers' intellectual well-being, which in turn will positively affect their social standing.

Figures 6-8 show that there is no negative dimensional impact on consumers, value chain actors and the society at large. Results from the study, as can be seen in the Figures, showed that the three stakeholder groups would enjoy outstanding environmental benefits. Furthermore, workers and value chain actors stand to reap more economic benefits than the other two stakeholder groups. Moreover, results showed that the Value Chain Actors in the agrifood sector would benefit most from implementing circularity in the agricultural sector. This is understandable as implementation of circularity in the sector would enable them to reduce losses and earn income from the valorization of the would-be wastes into saleable value-added commodities and providing them additional streams of income generating endeavors.

5. Conclusions

This study provided an overview of the potential social impacts of adopting circular economy principles in Nigeria’s agricultural industry. A key contribution of this study is the identification of various socio-economic factors that could influence the successful implementation of circular economy practices in Nigeria's agricultural sector. It also provided a robust set of metrics for evaluating different dimensions of human well-being as they relate to the circular agri-food system.

The results of the analysis showed that adopting circularity in the Nigerian agricultural sector is economically beneficial, socially and culturally supportive, and environmentally sustainable. It also revealed that all the four stakeholder groups stand to gain from the adoption of circular economy practices in the Nigerian agricultural industry. The findings from this study would be a solid foundation for more in-depth research on the adoption of circular agri-food models both in the

developed and developing countries, offering valuable insights into the development of circular agribusiness case studies at varying levels and complexities.

References

1. Michael, E.O.; Agricultural Sector Performance and Nigeria's Economic Growth. *Asian J. of Agric. Ext., Econ. & Soc*. **2017,** *1(1)*, 1-13.
2. Izuchukwu, O.O.; Analysis of the Contribution of the Agricultural Sector on Nigerian Economic Development. *World Rev. of Bus. Res.* **2011**, *1(1)*, 191 - 200.
3. Sertoğlu1,K.; Ugural, S. and Bekun, F.V.; The Contribution of the Agricultural Sector on Economic Growth of Nigeria. *Int. J. Econ. and Fin. Issues* **2017**, *7(1)*, 547-552.
4. Abbas, A.M.; Abbas, I.I.; & Agada, I.G., Reducing postharvest losses in Nigeria's agricultural sector: pathway to sustainable agriculture. *Innoriginal: International Journal of Sciences*, **2018**, *5(2)*, 16-21.
5. Olukunle, O.T.; Challenges and prospects of agriculture in Nigeria: the way forward. *J. Econs and Sust. Dev.*, **2013**, *4(16)*, 37-45.
6. Ogundele F. Post-Harvest Losses and Food Security in Nigeria: An Empirical Review. *African J. Agric. and Food Sci*. **2022**, 5(3), 77-89.
7. Kolawole ID, Kolawole GO, Sanni-manuel BA, Kolawole SK, Ewansiha JU, Kolawole VA, Kolawole FO., Economic impact of waste from food, water, and agriculture in Nigeria: challenges, implications, and applications—a review. *Discover Environment* **2024,** *2(1): 51*.
8. Gobel, C., Langen, N., Blumenthal, A., Teitscheid, P., Ritter, G., Cutting food waste through cooperation along the food supply chain. *Sustainability*, **2015**, *7(2)*, 1429–1445.
9. Galanakis, C.M., Recovery of high added-value components from food wastes: conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends Food Sci. Technol*. **2012**, *26(2)*, 68–87.
10. Fernandez-Mena, H.; Gaudou, B.; Pellerin, S.; MacDonald, G.K.; Nesme, T., Flows in Agro-food Networks (FAN): An agent-based model to simulate local agricultural material flows. *Agric. Syst*., **2020**, *180*, 102718.
11. Mirabella, N., Castellani, V., Sala, S., Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *J. Clean. Prod.*, **2014,** *65*, 28–41.
12. Aznar-Sanchez, J.A., Velasco-Munoz, J.F., García-Arca, D., Lopez-Felices, B., Identification of opportunities for applying the circular economy to Intensive Agriculture in Almería (South-East Spain). *Agronomy*, **2020c**, *10*, 1499.
13. Kristensen, D.K., Kjeldsen, C., Thorsøe, M.H., Enabling sustainable agro-food futures: exploring fault lines and synergies between the integrated territorial paradigm, rural Eco-economy and circular economy. *J. Agric. Environ. Ethics*, **2016**, *29*, 749–765.
14. Velasco-Munoz, J.F; Joan Manuel F. Mendoza, J.M.F.; Aznar-Sanchez, J.A. and Gallego-Schmid, A., Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. *Resour., Conserv. & Recycl.*, **2021**, *170,* 105618, 1-15
15. Aznar-Sanchez, J.A., Mendoza, J.M., Ingrao, C., Failla, S., Bezama, A., Nemecek, T., Gallego-Schmid, A., Indicators for circular economy in the agri-food sector. *Resour. Conserv. & Recycl.*, **2020b**, *163*, 105028.
16. Cristobal, J., Castellani, V., Manfredi, S., Sala, S., Prioritizing and optimizing sustainable measures for food waste prevention and management. *Waste Manage*., **2018**, *72*, 3–16.
17. Mikielewicz, D., Dąbrowski, P., Bochniak, R., Gołąbek, A., Current status, barriers and development perspectives for circular Bioeconomy in polish south Baltic area. *Sustainability*, **2020**, *12* (21), 9155.
18. Borrello, M., Lombardi, A., Pascucci, S., Cembalo, L., The seven challenges for transitioning into a bio-based circular economy in the Agri-food sector. *Recent. Pat. Food. Nutr. Agric.*, **2016**, 8 (1), 39–47.
19. Dunmade, I.S., The pursuit of circular economy goals in Africa: An exploratory study on the activities of the African Union and its member states. *J. Popular Edu. in Africa*, **2018**, *2(3)*, 64 - 71.
20. Notarnicola, B.; Sala, S.; Anton, A.; McLaren, S. J.; Saouter, E.; Sonesson, U.,The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *J. Cleaner Prod.*, **2017**, *140*, 399-409.

21. Marting Vidaurre, N.A.;Vargas-Carpintero, R.; Wagner, M.; Lask, J.; Lewandowski, I., Social aspects in the assessment of biobased value chains. *Sustainability*, **2020**, *12*(23), 9843.
22. Rivera-Huerta, A.; Rubio Lozano, M. d. l. S.; Padilla-Rivera, A.; Güereca, L.P., Social Sustainability Assessment in Livestock Production: A Social Life Cycle Assessment Approach. *Sustainability*, **2019**, *11(16)*, 4419.
23. Bhatnagar, A., Härri, A., Levänen, J., & Niinimäki, Exploring the role of social life cycle assessment in transition to circular economy: A systematic review. *Resour., Conserv. & Recyc.*, **2024**, *207*, 107702.
24. Benoît Norris, C., Traverzo, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T., & Russo Garrido, S., Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations, UNEP, **2020**.
25. Andrews, E. S., Guidelines for social life cycle assessment of products: social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development. *UNEP/Earthprint*, **2009**,
26. Prasara-A, J., & Gheewala, S. H., Social Life Cycle Assessment of Agricultural Products: Experiences on Rice, Sugarcane and Cassava. Social Life Cycle Assessment: Case Studies from Agri and Food Sectors, **2018**, 1.
27. Marting Vidaurre, N. A., Vargas-Carpintero, R., Wagner, M., Lask, J., & Lewandowski, I., Social aspects in the assessment of biobased value chains. *Sustainability*, **2020**, 12(23), 9843.
28. Benoît, C.; Mazijn, B., Guidelines for social life cycle assessment of products. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Druk in de weer, Belgium, **2009**.
29. UNEP/SETAC, Methodological sheets for 31 sub-Categories of impact for a social LCA of products. www.estis.net/sites/lcinit/default.asp?site=lcinit&page_id=A8992620-AAAD-4B81-9BACA72AEA281CB9. Retrieved in January **2013**.
30. Dunmade, I., Socioeconomic Impacts of Bottled Water Production and Consumption System in a Developing Economy: A Lifecycle Approach. *Int. J. Bus. and Manage. Studies*, **2017**, *6*, 471 - 484.
31. Benoit, C.; Niederman, G.V., Social sustainability assessment literature review. The Sustainability Consortium, Arizona State University and University of Arkansas, **2010**.
32. Benoît, C., Aulisio, D., and Norris G.A., Identifying social impacts in product supply chains: overview and application of the social hotspot database. *Sustainability,* **2012**, 4:1946–1965
33. Dreyer, L.C.; Hauschild, M.Z.; Schierbeck, J., A framework for social life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess*., **2006**, *11(2)*:88–97.
34. Dunmade, I.S.; Onawumi, S.; Loto, C.;Oyawale, F., A social lifecycle assessment model for sachet water production and consumption in Nigeria. *CUICADI Int.Conf. African Dev.Issues,* **2016**, 108-114,
35. Dreyer, L.C.; Hauschild, M.Z.; Schierbeck, J., Characterisation of social impacts in LCA, Part 1: development of indicators for labour rights. *Int J Life Cycle Assess.*, **2010a**, *15(3):*247–259.
36. Dreyer, L.C.; Hauschild, M.Z.; Schierbeck, J., Characterisation of social impacts in LCA, Part 2: implementation in six company case studies. *Int J Life Cycle Assess*., **2010b**, *15(4)*:385–402
37. Ekener-Petersen, E.; Finnveden, G.; Potential hotspots identified by social LCA—part 1: a case study of a laptop computer. *Int J Life Cycle Assess*., **2013**, *18(1)*:127–143.
38. Hauschild, M.Z; Dreyer, L.C.; Jørgensen, A., Assessing social impacts in a life cycle perspective—lessons learned. *CIRP Ann Manuf Technol*., 2008, *57*:21–24.
39. Jørgensen, A.;, Le Bocq, A.; Nazarkina, L; Hauschild, M.Z., Methodologies for social life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess*., **2008**, 13(2):96–103.
40. Kruse, A.K.; Flysjo,A.; Kasperczyk,N., Socioeconomic indicators as a complement to life cycle assessment—an application to salmon production systems. *Int J Life Cycle Assess.,* **2009**, *14*:8–18
41. Norris, G.A., Social impacts in product life cycles: towards life cycle attribute assessment. *Int J Life Cycle Assess.,* **2006**, *11*(1):97– 104
42. Reitinger, C.; Dumke, M.; Barosevcic, M.; Hillerbrand, R., A conceptual framework for impact assessment within SLCA. *Int J Life Cycle Assess.*, **2011**, *16*(4):380–388
43. Tragnone, B.M.; Manuela D'Eusanio,M.; Petti, L., The count of what counts in the agri-food Social Life Cycle Assessment. *J. Cleaner Prod.*, **2022**, 354, 131624.

Estudo do comportamento agronómico de variedades de arroz: importância para as regiões produtoras

António Jordão[1], Isabel Fernandes[2]

[1]Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. Unidade de Agricultura e Pescas, DIAPA-Polo de Inovação de Coimbra, Portugal; email: antonio.jordao@ccdrc.pt

[2] DGAV-Direção Geral de Alimentação e Veterinária, Divisão de Sementes e Variedades, Tapada da Ajuda, Lisboa, Portugal; email: isabel.fernandes@dgav.pt

Abstract: Field trials to evaluate the agronomic behavior of rice varieties took place between 2015 and 2022 at the Bico da Barca Experimental Unit, located in the middle third of the Baixo Mondego valley. These trials are part of the National Rice Trial Network in which essential criteria such as productivity, vegetative cycle, tolerance to pests and diseases, in addition to other physiological and phytosanitary parameters are evaluated. Varieties that meet all requirements can be registered in the National Variety Catalogue (CNV), an official document that brings together all plant varieties approved for use and sale in Portugal, including rice (*Oryza sativa* L.), published annually by the General Directorate of Food and Veterinary Medicine (DGAV), an entity overseen by the Ministry of Agriculture and Fisheries. During this period, twelve rice varieties were studied, seven of which were registered with the CNV and four of which resulted from research and conservation work on genetic resources carried out within the scope of the National Rice Genetic Improvement Program. For the first time, consumers have access to a national variety of rice – Caravela, which was obtained through the Improvement Program.

Keywords: productivity, vegetable cycle, National Test Network, National Variety Catalogue, Caravela

1. Introdução

De acordo com a legislação nacional e comunitária, salvaguardando as excepções previstas na lei, só é admitido produzir, certificar e comercializar semente de variedades de arroz inscritas no Catálogo Comum de Variedades de Espécies Agrícolas ou no Catálogo Nacional de Variedades de Espécies Agrícolas e Hortícolas (CNV), de acordo com o disposto no Decreto-Lei nº 42/2017 de 6 de Abril. Os Catálogos Comuns são o somatório de todas as variedades que se encontram inscritas nos catálogos nacionais dos estados-membros podendo as suas sementes serem produzidas e comercializados em toda a União Europeia [1].

A primeira edição do CNV foi publicada em 1982, ano em que foram inscritas sete variedades duas das quais de obtenção nacional. Até 1988, foram inscritas mais de cinquenta variedades no CNV, com idêntica repartição entre o número de variedades nacionais e estrangeiras.

O estudo das variedades de arroz candidatas à inscrição no CNV foi executado segundo normas definidas internacionalmente, encontrando-se estabelecidas nos Planos de Ensaios e Regulamentos Técnicos, elaborados e divulgados pela DGAV, as condições de experimentação e os critérios de avaliação das variedades [2][3].

As variedades de arroz propostas para inscrição foram sujeitas a ensaios oficiais de Distinção, Homogeneidade e Estabilidade (DHE) que foram estabelecidos de acordo com o Protocolo técnico de variedades de arroz do Instituto Comunitário das Variedades Vegetais CPVO – TP 16/3, de 1 de outubro de 2015 [5]. Foram igualmente submetidas a ensaios de Valor Agronómico e de Utilização (VAU), que foram realizados de acordo com um protocolo comum e organizados na Rede Nacional de Ensaios de variedades de arroz (RNE) [1], cuja coordenação é da responsabilidade da DGAV, cabendo ao Centro de Competências do Arroz (COTArroz-CC), em Salvaterra de Magos, e aos serviços de agricultura regionais a instalação e condução dos ensaios.

A inscrição de variedades no Catálogo só pode ser feita se todos os requisitos definidos no Regulamento Técnico [2] estiverem preenchidos.

A CCDRC tem participado com a DGAV na execução do ensaio da RNE de arroz no Baixo Mondego, que se apresenta de extrema importância para o sector orizícola, por permitir inscrever variedades nacionais e estrangeiras no CNV, por divulgar as novas variedades e permitir conhecer a sua adaptação e o seu comportamento às condições edafoclimáticas da região. No caso particular da inscrição de variedades nacionais de arroz, este facto torna-se ainda mais importante, por apresentar notórias vantagens económicas: diminuição da importação de semente e consequente impacto na balança comercial do país; redução de custos para o produtor no factor de produção de semente; libertação de *royalties* em Portugal para financiar o melhoramento e investigação nacional no sector, permitindo a sustentabilidade do processo de obtenção de novas variedades; e qualitativas: menor dependência exterior do sector; melhor conhecimento sobre o comportamento da(s) variedade(s); disponibilizar aos agricultores nacionais novas variedades ajustadas às condições agroeconómicas do sistema de produção de arroz em Portugal [7] e de exigências do consumidor português, nomeadamente na qualidade do arroz carolino e melhor capacidade concorrencial para defesa da fileira [4].

Entre 2015 e 2022 foram estudadas diversas variedades de arroz, algumas das quais obtidas pelo Programa Nacional de Melhoramento Genético de Arroz, o qual tem o seu foco na investigação em melhoramento genético e conservação de recursos genéticos de arroz.

2. Materiais e métodos

A instalação do ensaio da RNE de arroz decorreu no Unidade Experimental do Bico da Barca, unidade integrada no Polo de Inovação de Coimbra da CCDRC, localizada no terço médio do Baixo Mondego, no bloco de rega da Carapinheira (concelho de Montemor-o-Velho) (Figura 1).

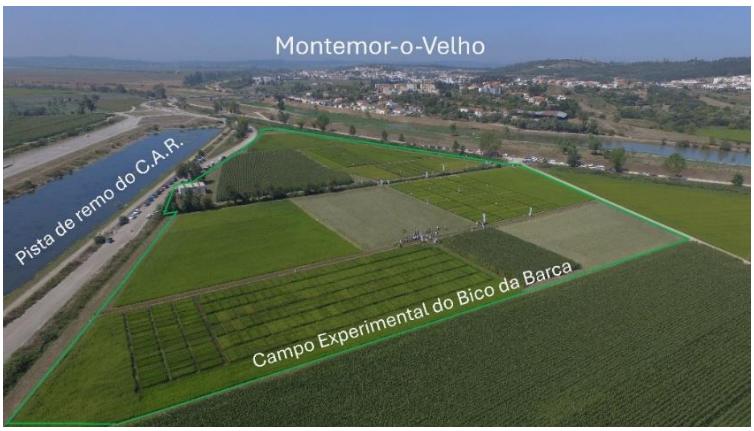


Figura 1 – Localização do Campo Bico da Barca (coordenadas: 40°10'31.8" N; 8°39'39.3" W)

Os solos desta Unidade Experimental são bem representativos de quase metade (46 %) dos solos que se encontram no Baixo Mondego, classificando-se como Aluviossolos Modernos não calcários, com textura franco-limosa, profundos, apresentam pH ácido, com pH (H_2O) de 5,2, com valores médios de fósforo e de potássio e com teor médio de matéria orgânica.

O método de implantação do Ensaio de VAU encontra-se definido pelo "Plano de Ensaio – Estudo do valor agronómico de ensaios de arroz", aprovado em Conselho Técnico da Protecção da Produção Agrícola (CTPPA), que fornece as indicações sobre o delineamento estatístico, as técnicas culturais e as observações e registos. [2]

As variedades testemunhas foram aprovadas pelo CTPPA, segundo proposta da Divisão de Variedades e Ensaios (DVS) da DGAV, sendo escolhidas entre as variedades bem conhecidas e adaptadas às condições agroclimáticas do nosso país, tendo particular atenção ao seu ciclo vegetativo e ao tipo comercial, os quais deverão ser semelhantes aos das variedades a estudar. [2]

No caso das variedades a ensaiar, estas foram propostas por entidades do melhoramento nacional ou por representantes de melhoradores estrangeiros, as quais foram aceites pelo CTPPA, sendo submetidas a dois anos de ensaio, obrigatoriamente. Excepcionalmente, as variedades cujos resultados obtidos não permitam uma análise criteriosa e definitiva podem ser sujeitas a um terceiro ano de ensaios. [2]

Na Tabela 1 estão indicadas as variedades candidatas ao CNV (identificadas por um código) e as variedades testemunhas que fizeram parte do ensaio da RNE de arroz no período 2015-2022.

Tabela 1. Lista das variedades (candidatas e testemunhas) do ensaio da RNE

Variedades	**Anos**							
	2015	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**
candidatas	OP 1001 OP 1203 OP 1109 OP 1207	OP 1001 OP 1203	17096 17097	17096 17097	17095 19040 19041	17095 19040 19041	21065 21066	21065 21066 22027
testemunhas	Ariete Ronaldo Sprint	Ariete Ronaldo Sprint	Ariete Presto	Ariete Presto	Ariete Presto Sprint	Ariete Presto Sprint	Ariete Lusitano	Albatros Ariete Lusitano Sprint

O delineamento estatístico usado foi o de blocos casualizados, com quatro ou cinco repetições separadas entre si por ruas de um metro, os talhões ou blocos tinham 50 m^2, separados também por ruas de um metro. [3]

A instalação do ensaio foi feita em canteiro representativo das condições dominantes no Baixo Mondego, a entrada de água no canteiro encontrava-se afastada dos talhões do ensaio, que foi semeado com algum afastamento das marachas para minimizar os efeitos causados pela bordadura (ataques de pássaros, altura da lâmina de água, presença de infestantes, entre outros).

A sementeira foi efectuada com canteiro inundado, a semente foi previamente chumbada em água, havendo cautela para prevenir o deslocamento das sementes entre talhões evitando assim a mistura de variedades.

A densidade de sementeira utilizada foi calculada com base no peso de mil grãos e na faculdade germinativa da semente de cada variedade, semeando-se 600 grãos viáveis por metro quadrado. [2]

A data de colheita foi determinada de acordo com o ciclo vegetativo e o estado de maturação das variedades e o teor de humidade que as mesmas apresentavam

próximo da data da sua realização. Em determinados anos, a ocorrência de precipitação na altura em que esta operação estava prevista atrasou o seu início.

Na Tabela 2 indicam-se as datas em que ocorreram a sementeira e a colheita do ensaio de VAU, entre 2015 e 2022.

Tabela 2. Datas de sementeira e de colheita do ensaio de VA

	Anos							
	2015	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**
Data de sementeira	15/mai	23/mai	09/mai	18/mai	16/mai	07/mai	05/mai	11/mai
Data de colheita	26/out	21 a 28/out	11/set a 4/out	24/set a 8/out	19/set a 15/out	14 a 30/set	27/set a 4/out	22 a 30/set

A preparação do solo, as fertilizações de fundo e de cobertura, as aplicações de produtos fitofarmacêuticos (herbicidas e fungicidas) e a sementeira foram as correntemente utilizadas pelos orizicultores na região, encontrando-se na Tabela 3 a estratégia de fertilização adoptada de 2015 a 2022, com indicação das fases do ciclo vegetativo da cultura em que foi realizada esta operação e as unidades fertilizantes aplicadas por hectare.

Tabela 3. Fertilização do ensaio de VAU entre 2015 e 2022

	Fertilização (fases de aplicação e U.F./ha)		
Anos	**de fundo**	**de cobertura**	
		ao afilhamento	**ao encanamento**
2015	49 N - 98 P - 98 K	50 N	16 N
2016	52,5 N - 52,5 P - 52,5 K	51 N	15 N
2017		50 N	
2018	49,5 N - 49,5 P - 49,5 K		
2019			
2020			
2021		60 N	
2022	54 N - 54 P - 54 K	66 N	

Na Tabela 4 apresentam-se as aplicações de herbicidas e de fungicidas, com referência do ciclo vegetativo da cultura no momento da aplicação e das doses dos produtos fitofarmacêuticos utilizadas por hectare, no período 2015 a 2022.

Tabela 4. Aplicação de produtos fitofarmacêuticos no ensaio de VAU, entre 2015 e 2022

	Herbicidas		Fungicidas	
	(fase de aplicação, s.a. e dose/ha)		(ciclo vegetativo, s.a. e dose/ha)	
Anos	**pré-sementeira**	**pós-emergência**	**emborrachamento**	**espigamento**
2015	oxadiazão - 1,05 l/ha	penoxsulame - 2 l/ha; bentazona - 4 l/ha	triciclazol - 300 g/ha	azoxistrobina - 1 l/ha
2016				
2017		penoxsulame, cihalofope-butilo - 3 l/ha; bentazona - 4 l/ha	azoxistrobina - 1 l/ha	
2018			azoxistrobina, difenoconazol - 1 l/ha	trifloxistrobina - 250 g/ha
2019		penoxsulame, cihalofope-butilo - 3 l/ha; pretilacloro - 2 l/ha; florpirauxifen-benzilo - 1,2 l/ha	trifloxistrobina - 250 g/ha	azoxistrobina, difenoconazol - 1 l/ha
2020				
2021				
2022		cihalofope-butilo, florpirauxifen-benzilo - 2,5 l/ha penoxsulame, florpirauxifen-benzilo - 2 l/ha		

3. Resultados

As informações sobre a instalação e condução do ensaio, bem como as que são referentes aos parâmetros de campo observados, foram registadas nas fichas de registo que constam do Anexo I [3]. Procedeu-se também a outros registos de campo para efeitos de avaliação do Valor Agronómico (VA) [2] aos quais se acrescentaram os aspectos fisiológicos e fitossanitários que poderiam pôr em causa a regularidade da produção.

Apresentam-se na Tabela 5 os resultados alcançados nos ensaios de campo pelas variedades que satisfizeram todas as condições para inscrição no CNV, com indicação do código de ensaio, da produção por hectare, neste caso com os valores médios da RNE e dos obtidos no Unidade Experimental do Bico da Barca, área acamada, altura da palha, ciclo vegetativo e designação das variedades no CNV.

Tabela 5. Valor agronómico das variedades de arroz inscritas no CNV, de 2015 a 2022

Código das variedades	Produção BB(1) (t/ha)	Produção nacional (t/ha)	Área acamada(2) (%)	Ciclo vegetativo (nº dias)	Altura da palha (cm)	Designação das variedades
OP 1001	7,900	7,550	1	148	44,4	Maçarico
OP 1203	6,600	6,500	1	140	63,8	Ceres
17096	8,239	7,700	1	129	52,6	Lusitano
17097	8,657	7,350	1	144	48,0	Diana
19041	8,292	6,880	1	128	63,4	Caravela
21065	6,430	6,209	1	136	54,9	Ibérico CL
21066	7,034	7,524	1	131	49,9	Sintra

(1) – produções obtidas na Unidade Experimental do Bico da Barca
(2) – na escala de registo da área acamada, "1" refere-se à ausência de acama

Na Tabela 6 estão indicadas as escalas de registo para os parâmetros “acama”, “resistência à `brança”, “desgrana” e “estragos causados por doenças e pragas”.

Tabela 6. Escalas de registo para características fisiológicas e fitossanitárias

Escala	Acama	Resistência à brança	Desgrana	Estragos causados por doenças e pragas
1	ausência de acama	muito alta (0-10% do grão brançado)	resistente	ausência de estragos
3	menos de 25% do talhão acamado	alta (11-15% do grão brançado)		menos de 25% das plantas afetadas
5	25-50% do talhão acamado	mediana (16-20% do grão brançado)	moderadamente resistente	25-50% das plantas afetadas
7	50-75% do talhão acamado	fraca (21-30% do grão brançado)	moderadamente susceptível	50-75% das plantas afetadas
9	mais de 75% do talhão acamado	insignificante (mais de 30% do grão brançado)	muito susceptível	mais de 75% das plantas afetadas

Entre 2015 e 2022 foram estudadas, no total, doze novas variedades de arroz e utilizadas seis variedades testemunhas. Entre as novas variedades ensaiadas, mais de 50 % provieram do Programa Nacional de Melhoramento Genético de Arroz, embora apenas um terço tenha sido inscrito no CNV.

4. Discussão

Os resultados obtidos pelas sete variedades de arroz que se encontram inscritas no CNV evidenciaram boa adaptação às condições edafoclimáticas do Baixo Mondego, tendo expressado o seu potencial produtivo relativamente aos indicadores obtidos para as principais regiões produtoras de arroz.

As diferenças ocorridas devem-se sobretudo às condições edafoclimáticas das regiões onde decorreram os ensaios da RNE, conforme referiram Almeida, A. et al. [6] “… o comportamento dos genótipos varia com a região em que são cultivados, reforçando a importância de se realizarem ensaios multilocais”, mas também outros factores críticos, como por exemplo, a oportunidade de realização da instalação da cultura e da colheita.

Nos anos de 2015, 2016, 2018 e 2019 as sementeiras ocorreram cerca de 10 a 14 dias mais tarde que a data ideal para a sua realização, tendo em consideração as características edafoclimáticas na zona onde os ensaios foram implementados.

Tal como na sementeira, também a colheita dos ensaios foi realizada mais tarde que o previsto, sobretudo nos anos de 2015, 2016 e 2019, quer devido ao atraso verificado aquando a instalação do ensaio quer devido à excessiva precipitação que

ocorreu na fase final da maturação, obrigando que a colheita decorresse mais devagar e com mais precaução para evitar implicações na recolha de dados e nos resultados do ensaio, situação esta que também se verificou em 2021 e 2022.

O atraso na realização da colheita determinou, em alguns anos, um teor de humidade à colheita inferior ao recomendável para a maioria das variedades de arroz, parâmetro este que é muitas vezes penalizador para um número significativo de variedades por ter uma relação directa com o aumento do teor de trincas e por conseguinte uma diminuição do rendimento industrial. É com base nesta relação que é atribuído o preço final da produção e definido o grau de bonificação atribuído à produção de arroz entregue.

Exceptuando a variedade "Sintra", todas as outras variedades de arroz estudadas durante estes oito anos obtiveram uma produtividade média superior na Unidade Experimental do Bico da Barca relativamente à registada na RNE.

Em termos da percentagem de área acamada, verificou-se "ausência de acama" para todas as variedades, enquanto no parâmetro "ciclo vegetativo" (número de dias desde a sementeira até à maturação) as variedades Maçarico e Diana apresentaram os valores de 148 e de 144 dias até à maturação, respectivamente. No que diz respeito à altura da palha (medida entre o colo e o nó inferior da panícula), as variedades Ceres e Caravela podem-se considerar variedades de palha alta por apresentarem valores muito próximos de 63 a 64 centímetros, o que pode tornar estas variedades mais susceptíveis à acama, sobretudo em solos mais férteis ou se o produtor adoptar uma fertilização mais rica em azoto.

5. Conclusões

O presente trabalho teve como principal objectivo resumir o estudo do desempenho agronómico e a adaptação de novas variedades de arroz às condições edafoclimáticas do Baixo Mondego, com vista à sua inscrição no CNV. Os resultados obtidos evidenciaram que, das doze variedades estudadas entre 2015 e 2022, sete foram inscritas no CNV, as quais se destacaram pela sua boa adaptação à região e pelo seu potencial produtivo.

Verificou-se que a produtividade média foi superior na Unidade Experimental do Bico da Barca por comparação com a Rede Nacional de Ensaios (RNE) e todas as variedades apresentaram ausência de acama.

Estes resultados reforçam a importância dos ensaios multilocais para avaliar o comportamento das variedades em diferentes contextos regionais e sublinham o

impacto de fatores críticos, como a oportunidade da sementeira e da colheita, na qualidade final da produção.

O Caravela foi a mais recente variedade portuguesa de arroz inscrita no CNV, obtida pelo Programa Nacional de Melhoramento Genético do Arroz e já está disponível ao consumidor. [8]

A complexidade dos mercados internacionais, as alterações climáticas na zona mediterrânica, as restrições ao uso de produtos fitofarmacêuticos e a exigência do consumidor por um produto cada vez mais específico e ambientalmente responsável influenciam as necessidades da fileira, e por consequência o objetivo do Programa Nacional de Melhoramento de Arroz. Tudo isto torna dinâmico, contínuo e participativo o processo de obtenção de variedades melhoradas de arroz. [8]

O Programa Nacional de Melhoramento Genético do Arroz espera continuar a disponibilizar aos agricultores nacionais novas variedades ajustadas às condições agro-económicas do sistema de produção de arroz em Portugal e contribuir para a valorização da sua fileira em Portugal. [8]

Estas informações podem ser estratégicas em termos do planeamento agrícola ao nível de cada região produtora de arroz, uma vez que possibilita a recomendação de variedades mais adequadas às características dos solos, do clima e à forma como é efectuada a condução da cultura. Além disso, uma escolha mais criteriosa das variedades pode contribuir para uma utilização mais eficiente dos recursos naturais, para a redução de custos com factores de produção e para o aumento da rentabilidade da cultura.

A adopção de variedades adaptadas também representa um avanço significativo em termos de sustentabilidade, uma vez que pode promover práticas agrícolas mais resilientes e menos dependentes de agroquímicos.

Desta forma, conclui-se que um conhecimento mais aprofundado do comportamento agronómico das variedades de arroz é um instrumento indispensável para a sustentabilidade económica, social e ambiental da orizicultura.

Referências

1. Direcção Geral de Alimentação e Veterinária. Catálogo Nacional de Variedades, Espécies Agrícolas e Hortícolas, Edição de 2024, 1.ª versão; Direcção de Serviços de Sanidade Vegetal/Direcção Geral de Alimentação e Veterinária, Lisboa, 2024.
2. Direcção Geral de Alimentação e Veterinária. Regulamento Técnico – Avaliação de Variedades de Arroz, Janeiro de 2024.; DGAV-DSSV, DSV-09/2024, Lisboa.

3. Direcção Geral de Alimentação e Veterinária. Plano de Ensaio – Estudo do valor agronómico de ensaios de arroz, Janeiro de 2024; DGAV-DSSV, DSV-08/2024, Lisboa.
4. Almeida, A. Inscrição no Catálogo Nacional de Variedades de duas variedades portuguesas de arroz. Semente – Newsletter; Associação Nacional dos Produtores e Comerciantes de Sementes; Fevereiro de 2017, p. 6.
5. Protocol for tests on distinctness, uniformity and stability - *Oryza sativa* L. Community Plant Variety Office (CPVO), CPVO-TP/016/3, 1 de Outubro de 2015.
6. Almeida, A. S.; Marques, P.; Jordão, A.; Silva, C.; Coutinho, J.; Palha, L.; Maçãs, B. Melhoramento Genético do Arroz em Portugal – principais resultados das actividades desenvolvidas em 2020. Vida Rural, Março de 2021, pp. 60-67.
7. COTARROZ - Centro de Competências do Arroz/INIAV. Melhoramento Genético do Arroz em Portugal – O desenvolvimento de novas variedades portuguesas de arroz. INIAV/COTARROZ, 2024.
8. Soares, C.; Semedo, J.; Simões, F.; Palha, L.; Almeida, A. S.; Maçãs, B. Desenvolvimento de variedades portuguesas de arroz: o exemplo do Caravela. Voz do Campo, Novembro de 2024.

Evaluación del efecto de la aplicación exógena de prolina como mitigador del estrés salino en Physalis ixocarpa Brot.

Francisco Gregório Do-Nascimento-Neto [1,*], Alone Lima Brito [1], Marilza Neves do Nascimento [1], Eva Sánchez-Hernández [2], Norlan Miguel Ruíz-Potosme [3], Pablo Martín-Ramos [2]

1 Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, 44036-900 Feira de Santana, Brasil; francisco.gregorio668@gmail.com, alone@uefs.br, mnnascimento@uefs.br

2 Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avda. Madrid 44, 34004 Palencia, España; eva.sanchez.hernandez@uva.es, pmr@uva.es

3 Escuela Politécnica Superior, Universidad Europea Miguel de Cervantes, C. del Padre Julio Chevalier, 2, 47012 Valladolid, España; nmruiz@uemc.es

* Correspondencia: francisco.gregorio668@gmail.com

Abstract: *Physalis ixocarpa* Brot., conocida popularmente como tomate verde, tomatillo, o tomate de fresadilla, es una especie vegetal originaria de México y Guatemala perteneciente a la familia de las solanáceas, cultivada extensivamente en regiones tropicales y subtropicales. Los frutos y plantas de *P. ixocarpa* tienen un alto valor nutricional y comercial en varios países. Sin embargo, uno de los principales desafíos que limita el incremento de la producción y productividad del cultivo de tomate de cáscara es la escasez y el elevado coste del agua de riego. La utilización de aguas de baja calidad podría ser una alternativa viable, pero requiere estrategias de manejo para mitigar el estrés salino en el cultivo. En este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar el efecto osmoprotector de la aplicación exógena de prolina. El material vegetal se estableció inicialmente en tubos con medio Murashige y Skoog suplementado con sacarosa y agar. Tras 15 días de cultivo, las plántulas se transfirieron a medio fresco suplementado con NaCl (75 mM) y diferentes concentraciones de prolina (0, 4, 6, 8 y 10 mM). Los efectos del tratamiento se analizaron mediante análisis morfofisiológicos y por caracterización vibracional de muestras de hojas, raíces y tallos. El análisis morfofisiológico mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en función del tratamiento en el número de hojas verdes, longitud radicular, masa seca de la raíz y masa seca del tallo, sin diferencias significativas en el número de hojas senescentes, longitud de la planta y masa seca de las hojas. La caracterización vibracional mediante espectroscopía ATR-FTIR reveló cambios significativos en la composición química, especialmente en las bandas correspondientes a polisacáridos estructurales, ligninas y grupos funcionales específicos de la prolina, evidenciando su incorporación efectiva en los tejidos vegetales. Estos resultados amplían el conocimiento sobre el papel de los aminoácidos como osmoprotectores en la respuesta de las plantas frente a estreses abióticos.

Keywords: *Physalis*; prolina; estrés salino; mitigación; espectroscopía infrarroja; osmoprotección

1. Introducción

El género *Physalis* (Solanaceae) comprende más de 100 especies caracterizadas por poseer un cáliz que envuelve y protege el fruto contra herbívoros e inclemencias climáticas [1]. En México, comúnmente conocidos como tomatillo, "tomate de cáscara" o "tomate verde", los frutos de *P. ixocarpa* son ampliamente utilizados en la cultura culinaria popular, como ingrediente en ensaladas, sopas, guisos y salsas, siendo hasta el momento la especie más extensivamente cultivada en ese país, lo que demuestra su importancia como recurso alimentario con un alto valor medicinal y económico [2]. Investigaciones previas han demostrado que, además de ser fuentes de nutrientes esenciales para la salud humana, como vitaminas C y B3, carbohidratos, proteínas y minerales [3], el extracto etanólico del fruto presenta actividad antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus* [4] y posee propiedades quimiopreventivas [5]. En este escenario, *Physalis* destaca como un género con diversos potenciales y aplicaciones biotecnológicas [6,7], especialmente los frutos de *Physalis ixocarpa* Brot., que en el contexto de la horticultura pueden considerarse como cultivos exóticos con un significativo valor de mercado añadido.

A nivel mundial, una amplia gama de condiciones ambientales estresantes (temperaturas extremas, sequía, alcalinidad, salinidad, radiación ultravioleta e infecciones por patógenos) resultan altamente perjudiciales para las plantas [8]. La salinidad, en particular, constituye uno de los principales factores de estrés abiótico, especialmente en regiones áridas y semiáridas, pudiendo afectar gravemente al desarrollo, rendimiento y calidad de los cultivos agrícolas, limitando así la producción de alimentos [9,10].

El cultivo del tomatillo se establece principalmente en zonas semiáridas, donde los cambios climáticos y los eventos de sequía ocurren con mayor frecuencia [11]. Durante el desarrollo del estrés hídrico, se ven comprometidos diferentes mecanismos bioquímicos, entre ellos, la fotosíntesis neta, el rendimiento efectivo del fotosistema II (PSII), la tasa de transporte de electrones, la síntesis de proteínas, el metabolismo de los lípidos, así como la morfología de la planta [12]. A nivel mundial, más de 800 millones de hectáreas se ven afectadas por problemas de salinidad [13], y el aporte de sales del agua de riego junto con las elevadas tasas de evapotranspiración ocasionan el acúmulo de sales en los suelos agrícolas [14].

Una de las mayores consecuencias del estrés causado por NaCl es la pérdida de agua intracelular, ante lo cual las plantas han desarrollado mecanismos adaptativos basados en la acumulación de osmolitos. Estos osmolitos son solutos orgánicos biocompatibles de bajo peso molecular, caracterizados por presentar cargas neutras que no interfieren con las reacciones metabólicas celulares [15-18]. Su

acumulación en el citoplasma permite incrementar la tolerancia hiperosmótica, equilibrar el potencial hídrico y contrarrestar el desequilibrio iónico generado por el secuestro vacuolar de Na^+ y Cl^- [19].

Para superar los problemas de absorción de agua en condiciones de estrés salino, las plantas necesitan acumular estos solutos compatibles tanto en el citosol como en orgánulos, manteniendo intacta la actividad enzimática. Aunque algunos de estos compuestos son iones esenciales como el K^+, la mayoría corresponde a moléculas orgánicas como: azúcares simples (principalmente glucosa y fructosa), alcoholes derivados (glicerol e inositoles metilados), azúcares complejos (trehalosa, rafinosa y fructanos), derivados de aminoácidos cuaternarios (prolina, glicina betaína, *β*-alanina betaína, etc.), aminas terciarias (1,4,5,5-tetrahidro-2-metil-1-4-carboxilpiramidina) y compuestos sulfónicos (o-sulfato de colina, dimetilsulfoniopropionato). Estos compuestos facilitan el movimiento del agua hacia el interior de las células radiculares al reducir el potencial osmótico [20].

Entre esta diversidad de osmolitos, la prolina destaca por su función crioprotectora y osmoreguladora. Su presencia en concentraciones elevadas constituye un indicador de tolerancia al estrés, habiéndose demostrado su capacidad para aumentar la resistencia a la congelación tanto en levaduras como en plantas. Los niveles intracelulares de prolina aumentan significativamente en respuesta a condiciones ambientales adversas, superando con creces su concentración fisiológica basal [21]. Esta capacidad de acumulación constituye un marcador de adaptación al estrés hídrico ampliamente utilizado como criterio de selección en la identificación de especies con tolerancia o resistencia excepcionales [22].

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es verificar la acción de la aplicación exógena de prolina como mitigador del estrés salino en *P. ixocarpa* cultivada *in vitro*, mediante análisis morfofisiológicos y bioquímicos, utilizando espectroscopía infrarroja.

2. Materiales y Métodos

2.1. Material vegetal y reactivos

Las semillas de *P. ixocarpa* fueron suministradas por plantas cultivadas en la Unidad Horto Florestal de la Universidad Estadual de Feira de Santana (UEFS, Brasil). Se germinaron en tubos de vidrio en condiciones controladas, con tasas de germinación del 100%.

La sacarosa (CAS 57-50-1), agar (CAS 9002-18-0), medio Murashige y Skoog (CAS 10043-35-3), cloruro de sodio (NaCl; CAS 7647-14-5) y ácido clorhídrico (HCl; CAS 7647-01-0) fueron suministrados por Merck KGaA (Darmstadt, Alemania).

2.2. Experimentos in vitro

El medio de cultivo inicial (4 L) se preparó con sacarosa, agar y medio Murashige y Skoog (MS), ajustándose a pH 5,7 con ácido clorhídrico (HCl). A continuación, el medio se calentó hasta ebullición, retirándose cada dos minutos para homogeneización. Tras la preparación, se distribuyeron 15 mL de la solución en 210 tubos de vidrio (25 mm de diámetro y 150 mm de longitud), que fueron autoclavados durante 15 minutos a una temperatura entre 121 y 127 °C. Después, los tubos con el medio se transfirieron a la sala de inoculación donde, bajo una cámara de flujo laminar, se realizó la inoculación de 210 semillas de *P. ixocarpa*. Previamente, las semillas fueron desinfectadas en etanol al 70% durante 30 segundos, seguido de una solución de NaOCl (2,5% de cloro activo) con dos gotas de detergente neutro durante 10 minutos, y lavadas tres veces con agua destilada estéril. Transcurridos 15 días, las plántulas fueron transferidas a nuevos tubos de vidrio (25 mm de diámetro y 180 mm de longitud) con los medios de cultivo asociados al análisis del estrés salino y el efecto osmoprotector de la prolina.

El diseño experimental se estructuró en seis tratamientos diferenciados: un testigo sin estrés salino (exento de NaCl), un control con estrés salino (75 mM de NaCl) y cuatro tratamientos combinados que incluían tanto estrés salino (75 mM de NaCl) como distintas concentraciones de prolina (4, 6, 8 y 10 mM, respectivamente). Para cada tratamiento se establecieron siete repeticiones con cinco muestras cada una, sumando un total de 35 muestras por tratamiento. Esta disposición experimental permitió evaluar tanto el efecto del estrés salino por sí solo como la capacidad mitigadora de la prolina a diferentes concentraciones, usando como referencia comparativa plantas no expuestas al estrés (testigo).

Tras otros 15 días, las plantas se extrajeron de los tubos para análisis morfofisiológicos, midiéndose las siguientes variables: número de hojas verdes, número de hojas senescentes, longitud radicular, longitud del tallo y análisis de pigmentos de clorofila utilizando longitudes de onda de 649 y 664 nm. Posteriormente, el material se secó en estufa durante tres días a una temperatura de 38 °C. Tras el secado, se analizaron las variables de peso de materia seca: hoja, raíz y tallo.

2.3. Análisis espectroscópico del contenido en clorofila

Para la determinación de clorofila se recogieron dos discos de 5 mm de diámetro de cinco plantas. Los discos se transfirieron a tubos de ensayo con rosca cubiertos con papel de aluminio, que contenían 10 mL de alcohol al 95%. Tras 24 horas, el contenido de clorofila "a" y clorofila "b" se determinó espectrofotométricamente a longitudes de onda de 664 y 649 nm, respectivamente, en un espectrofotómetro UV-Vis/NIR Jasco V-670 (Jasco, Tokio, Japón), conforme a la metodología descrita por Lichtenthaler y Buschmann [23].

2.4. Caracterización vibracional

Para los análisis espectrales, se seleccionaron muestras del testigo (sin estrés salino), del tratamiento con solo sal (75 mM de NaCl) y del tratamiento combinado con sal y la mayor concentración de prolina (10 mM). Se realizaron tres repeticiones para cada parte de la planta (tallo, raíz y hojas). Las muestras se analizaron mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (ATR-FTIR), utilizando un espectrofotómetro Thermo Nicolet iS50 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, EE.UU.). Los espectros se obtuvieron en la región del infrarrojo medio (4000 a 400 cm^{-1}), con una resolución espectral de 4 cm^{-1} y 64 barridos por muestra. Los datos de vibración espectral se procesaron e interpretaron con el software OMNIC 9.3.32 (Thermo Fisher Scientific).

2.5. Análisis estadístico

Los datos morfofisiológicos se tabularon y analizaron estadísticamente mediante el software Sisvar versión 5.8 Build 98 (DES/UFLA, Brasil). Inicialmente, se comprobaron los requisitos de normalidad y homocedasticidad mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Levene. Una vez verificados estos requisitos, se realizó un análisis ANOVA seguido de agrupación mediante test de Tukey para un nivel de significación $p < 0,05$.

3. Resultados

3.1. Análisis morfofisiológicos

Los resultados de los análisis morfofisiológicos se resumen en la Tabla 1. No se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables hojas senescentes, longitud de parte aérea y peso seco de hojas.

En el caso de las hojas verdes, la aplicación de prolina tuvo un efecto positivo, con diferencias significativas respecto al control sometido a estrés salino y no tratado en el caso de la dosis de prolina más alta (10 mM). Ninguna de las dosis de prolina

presentó diferencias estadísticamente significativas respecto al testigo no sometido a estrés salino.

En la longitud radicular y el peso seco radicular, la aplicación de prolina condujo a valores significativamente más bajos, asociados a un desarrollo radicular menor.

En el peso seco del tallo, solo se encontraron diferencias significativas entre la dosis de prolina de 8 mM y el control sometido a estrés salino y no tratado. Todas las dosis de prolina fueron similares (ausencia de diferencias estadísticamente significativas) al testigo no sometido a estrés salino.

En cuanto a los contenidos de clorofila, las medidas a ambas longitudes de onda fueron coherentes, con los menores valores para el control sometido a estrés salino y no tratado y las plantas tratadas a la menor dosis de prolina (4 mM), valores intermedios para las dosis de tratamiento 6 mM y 10 mM y el control no sometido a estrés salino, y los contenidos mayores para la dosis de prolina 8 mM, superando incluso a los valores del testigo no tratado.

Tabla 1. **Resultados del análisis ANOVA seguido de test de Tukey (HSD) para las variables morfofisiológicas objeto de estudio.**

Tratamiento	Hojas verdes (nº)	Hojas senescentes (nº)	Longitud radicular (cm)	Longitud parte aérea (cm)	Peso seco raíz (g)	Peso seco hojas (g)	Peso seco tallo (g)	Contenido de clorofila	
								(649 nm)	(664 nm)
Testigo (sin NaCl)	0,951 ab	3,564 a	9,721 c	8,455 a	0,072 c	0,015 a	0,061 ab	0,088 ab	0,149 bc
Control (con NaCl)	0,404 a	3,301 a	8,540 bc	9,018 a	0,053 bc	0,013 a	0,073 b	0,066 a	0,051 a
NaCl+prolina 4 mM	1,176 ab	2,754 a	5,809 a	8,290 a	0,030 ab	0,013 a	0,048 ab	0,066 a	0,061 ab
NaCl+prolina 6 mM	1,394 ab	3,219 a	6,562 ab	8,422 a	0,023 a	0,015 a	0,047 ab	0,127 b	0,235 c
NaCl+prolina 8 mM	1,621 ab	2,900 a	5,079 a	8,718 a	0,019 a	0,013 a	0,044 a	0,190 c	0,363 d
NaCl+prolina 10 mM	2,186 b	2,987 a	6,239 ab	9,605 a	0,027 a	0,018 a	0,051 ab	0,133 b	0,234 c
Pr > F(Modelo)	0,007	0,172	< 0.0001	0,101	< 0.0001	0,324	0,022	< 0.0001	< 0.0001
Significativo	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí

Valores en la misma columna seguidos por diferentes letras indican diferencias significativas según el test de Tukey para $p < 0,05$.

3.2. Análisis vibracional

En la Tabla 2 se recogen las principales bandas —junto con sus asignaciones— de los espectros de espectroscopía infrarroja para las muestras de raíz, tallo y hoja del testigo no sometido a estrés salino (T0), del control sometido a estrés salino y no tratado (T1), y de las plantas tratadas con la mayor dosis de prolina (T5).

Tabla 2. **Principales bandas (en números de onda, cm^{-1}) de los espectros ATR-FTIR de muestras de raíz, tallo y hojas con sus asignaciones. La columna comentarios indica la presencia/ausencia de diferencias (S = significativa, NS = no significativa).**

Raíz			Tallo			Hojas			Asignaciones	Comentarios
T0	T1	T5	T0	T1	T5	T0	T1	T5		
714	715			715					flexión C-H (hemicelulosas)	variación no significativa (NS)
740	740			740					flexión fuera del plano de enlaces C-H aromáticos	constante
		769	760				764	767	deformación fuera del plano de enlaces C-H aromáticos	máxima variación: 9 cm^{-1} (NS)
771	772		777	771	776	777		776	deformación fuera del plano de enlaces C-H aromáticos	máxima variación: 6 cm^{-1} (NS)
787			810	787 (810r)	810	810	818 (809r)		estructuras siringilo en la lignina	desplazamiento de 787 a 810/818 cm^{-1} (S)
	828	827	825	(828r)	825	827	833		deformación fuera del plano de enlaces C-H aromáticos (flavonoides y lignina)	variación NS
			848	856	848	848			estructuras guayacilo en la lignina	variación NS
870	871			869			(873r)	867	estiramiento simétrico C-O-C en polisacáridos	variación NS
888	888	896	897	887	897	897	914		enlace β-glicosídico entre monosacáridos	desplazamiento de 888 a 898/914 cm^{-1} (S)
931	931	927	926	931	926	926	925	916	flexión C-H, características del anillo piranósico en celulosa y hemicelulosa	desplazamiento de 931 a 916 cm^{-1} (S)
966	967			966					deformación fuera del plano C-H en estructuras con dobles enlaces trans (=C-H)	constante
989	990			989					estiramiento C-O en celulosa y otros polisacáridos	constante
	1038	1029	1029	1038	1025	1016	1027	1031	tensión C-H (hemicelulosas); tensión C-O (celulosa); característica de glicósidos	desplazamiento de 1038 a 1016 cm^{-1} (S)
1064			1051	1065	1051	1050	1047	1051	tensión C-O en polisacáridos (celulosa, hemicelulosa, pectinas); típica de glicósidos	desplazamiento de 1065 a 1047 cm^{-1} (S)
1112			1101	1116	1102	1101	1096	1102	tensión asimétrica C-O-C en polisacáridos	desplazamiento de 1116 a 1096 cm^{-1} (S)

Tabla 2 (cont.). **Principales bandas de los espectros ATR-FTIR de muestras de raíz, tallo y hojas con sus asignaciones.**

Raíz			Tallo			Hojas			Asignaciones	Comentarios
T0	T1	T5	T0	T1	T5	T0	T1	T5		
1149	1149			1150	1131	1131			deformaciones del anillo en estructuras de piranosa (anillos de azúcares)	desplazamiento de 1150 a 1131 cm^{-1} (S)
1178	1175			1176	1161	1145		1147	vibraciones C-O-C en estructuras de éter aromático (como en ligninas)	desplazamiento de 1178 a 1145 cm^{-1} (S)
			1203		1203	1203	(1202r)		deformación O-H en ácidos carboxílicos; unidades siringilo en ligninas	constante (NS)
		1236					1233	1233	tensión de los enlaces C-O y C-N, así como vibraciones de flexión N-H.	específica de T5 en raíz y hojas
1247			1256	1256	1256	1256		1261	tensión C-N del anillo o flexión del CH_2 del anillo pirrolidínico (en prolina, a 1261 cm^{-1})	desplazamiento de 1247 a 1261 cm^{-1} (S)
			1282	(1281r)	1281	1282	(1280r)		característica de ligninas y algunos flavonoides	constante (NS)
			1317	(1316r)	1316	1316	1323	1322	tensión C-H del anillo en prolina; unidades siringilo en ligninas; tensión O-H (fenoles);	desplazamiento de 1316 a 1323 cm^{-1} (S); ausente en raíz
		1331	1334	(1333r)	1332	1332	1327		deformación C-H en celulosa y hemicelulosa	variación NS

		1362			1359	1359			deformación simétrica de grupos CH_3 (ligninas); vibraciones de anillo aromático en fenólicos	variación NS
1370	1369		1377	1371	1378				deformación simétrica de grupos CH_2 en celulosa y hemicelulosa; anillo ar. en fenoles	desplazamiento de 1370 a 1378 cm^{-1} (S); ausente en hojas
		1401		1409	1408	1409	1413	1399	flexión C-H y O-H; típica de celulosa; tensión simétrica COO- de la prolina	variación errática
							1436	1442	deformación asimétrica de grupos CH_2 del anillo pirrolidínico de la prolina; deformación de grupos CH_3 unidos al anillo de porfirina.	presente en hojas tratadas
				(1450r)	1449	1450	1452		deformación asimétrica de grupos $-CH_2-$ y deformación asimétrica de grupos $-CH_3$.	variación NS
			1485	1474	1483	1482			estiramiento C=C en anillos aromáticos.	variación errática
	1513	1516		(1515r)					típica de lignina	variación NS
			1542			1549	1541	1541	flexión -N-H (no específica de prolina: también en glicina, alanina, flavonoides y clorofila)	presente en hojas tratadas y no tratadas
			1586		1586	1587			tensión asimétrica de carboxilatos (COO^-) y tensión C=C en anillos aromáticos	variación NS
1656	1638	1615	1634	1636	1623	1625	(1630r)	1633	tensión asimétrica del grupo COO^-	desplazamiento de 1656 a 1615 cm^{-1} (S)
			1683		1683				tensión C=O en aldehídos, ácidos carboxílicos y fenoles (kaemferol)	constante; ausente en raíz y hojas
					1738		1739	1737	tensión C=O; característico del enlace acetil éster	presente en tallo tratado y hojas tratadas
			1762		1762				tensión C=O en ésteres, anhídridos o lactonas.	constante
						2917	2917	2918	tensión asimétrica de enlaces C-H en grupos metileno ($-CH_2-$) y metilo ($-CH_3$).	variación NS; solo presente en hojas
			2733		2731				"banda de Fermi" de aldehídos	variación NS
			2851		2850	2849	2849	2850	simétrico de enlaces C-H en grupos metileno ($-CH_2-$), típica de ceras	variación NS
2898	2896			2899					tensión C-H en grupos C-H de carbohidratos o celulosa.	variación NS
		2920	2919	(2917r)	2918				tensión asimétrica de enlaces C-H en grupos metileno ($-CH_2-$), típica de ceras	variación NS
2948	2949								tensión asimétrica de enlaces C-H en grupos metilo ($-CH_3$)	variación NS
			3212		3210	3211	(3212r)		O-H con distintos grados de enlaces de hidrógeno (celulosa, hemicelulosas, pectina...)	variación NS
	3266	3281	3279	(3284r)		3274	3281	3274	O-H con distintos grados de enlaces de hidrógeno (celulosa, hemicelulosas, pectina...)	variación errática
					3320		3328		O-H con distintos grados de enlaces de hidrógeno (celulosa, hemicelulosas, pectina...)	NS; presente en tallo tratado y hojas tratadas
3358									corresponde al estiramiento del enlace O-H o N-H	específica raíz no tratada
			3403		3402	3402			tensión O-H, típica de carbohidratos	variación NS

4. Discusión

4.1. Efectos de la prolina en el desarrollo de la parte aérea y en el contenido de clorofila

Entre 8 y 10 mM, la prolina parece haber atenuado los efectos de la sal al promover el control osmótico en las células, reduciendo el desequilibrio hídrico y protegiendo las estructuras foliares contra el estrés salino. Este papel osmoprotector de la prolina ha sido ampliamente reconocido en la literatura. Por ejemplo, Ghosh *et al*. [25] que señalan su capacidad para estabilizar el potencial hídrico celular, esencial para mantener la turgencia foliar, un efecto evidente en los tratamientos con 8 mM y 10 mM. Además, la prolina va más allá de la osmoprotección: actúa también como antioxidante y regulador de señales, desempeñando funciones múltiples cruciales para la adaptación de las plantas al estrés abiótico, según describe Shahid *et al*. [26]. Esta acción multifacética puede explicar la mayor resiliencia de las hojas verdes de *P. ixocarpa* bajo salinidad y aplicación exógena de prolina, sugiriendo que la prolina no solo protegió las células del daño osmótico, sino que también contribuyó a neutralizar especies reactivas de oxígeno y favorecer la señalización celular, promoviendo la adaptación al estrés.

De acuerdo con Alfosea-Simón *et al*. [24], la aplicación foliar de aminoácidos puede estimular el desarrollo vegetativo de plantas de tomate. Sin embargo, la alanina, cuando se aplica a 15 mM, resulta tóxica, un efecto que no se revierte ni siquiera al combinarla con otros aminoácidos, ocasionando alteraciones en los perfiles ionómico, fisiológico y metabolómico. Este patrón de toxicidad a dosis elevadas de aminoácidos encuentra concordancia en nuestra investigación con prolina: para el número de hojas verdes, el tratamiento con 10 mM de prolina se mostró prometedor, presentando diferencias estadísticamente significativas respecto al control sometido a estrés salino y no tratado. No obstante, en el caso del peso seco del tallo y del contenido de clorofila, la dosis de 8 mM de prolina fue la más favorable, distinguiéndose significativamente de los demás tratamientos. Por encima de esta concentración, se observó una reducción en el contenido de clorofila, sugiriendo un posible caso de fitotoxicidad similar al de la alanina. Este hallazgo refuerza la importancia de ajustar las dosis de aminoácidos para evitar respuestas negativas en las plantas.

4.2. Modificaciones en el desarrollo radicular bajo estrés salino

El análisis de los datos relativos al sistema radicular revela un patrón importante que merece una interpretación precisa. Las plantas del tratamiento testigo (sin NaCl) presentaron el mayor desarrollo radicular (9,72 cm) y peso seco de raíz (0,072 g), seguidas por las plantas sometidas únicamente a estrés salino (8,54 cm y 0,053 g, respectivamente), aunque sin diferencias estadísticamente significativas entre

ambos tratamientos según el test de Tukey. Por el contrario, todos los tratamientos con prolina mostraron una reducción significativa tanto en longitud como en peso radicular.

Esta respuesta contradice la hipótesis inicial de que el estrés salino por sí solo promovería un mayor desarrollo radicular como estrategia adaptativa. En su lugar, los datos sugieren que la adición de prolina exógena modifica sustancialmente la estrategia de asignación de recursos de la planta. Mientras que las plantas sometidas únicamente a estrés salino mantienen un desarrollo radicular similar al de las plantas no estresadas, la aplicación de prolina parece señalizar una respuesta adaptativa alternativa.

La prolina exógena podría estar actuando como un indicador bioquímico que "informa" a la planta de la disponibilidad de osmolitos suficientes, lo que reduce la necesidad de invertir recursos en el desarrollo radicular para la búsqueda de agua. En consecuencia, estos recursos se redirigen hacia la parte aérea, como evidencia el incremento en el número de hojas verdes y en el contenido de clorofila, especialmente con la dosis de 8 mM de prolina.

Escalante [27], en su estudio con dos variedades de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) sometidas a estrés salino, documentó respuestas genotipo-dependientes que pueden ayudar a la interpretación de nuestros resultados. La variedad Ba'alche, al igual que nuestras plantas de *P. ixocarpa* sin tratamiento de prolina, mantuvo un desarrollo radicular similar al control no estresado, representando una estrategia de "búsqueda de recursos" mediante el mantenimiento del crecimiento radicular. Por el contrario, la variedad Chan exhibió una reducción significativa del área radicular bajo estrés salino, similar a lo observado en nuestros tratamientos con prolina, sugiriendo una estrategia de conservación de recursos y redirección hacia procesos metabólicos de protección.

Estos hallazgos sugieren que la prolina exógena no solo actúa como osmoprotector directo, sino que también modula las respuestas adaptativas de la planta al estrés, alterando fundamentalmente los patrones de asignación de recursos entre órganos y favoreciendo la protección del aparato fotosintético sobre el desarrollo radicular.

4.3. Análisis de la redistribución de carbohidratos

El análisis de los espectros ATR-FTIR en el rango de 1149-990 cm^{-1}, característico de las vibraciones de estiramiento C-O-C y C-O de enlaces glicosídicos típicos de carbohidratos, revela patrones distintivos de asignación de carbohidratos entre los tratamientos control, salino y con prolina en los diferentes órganos de la planta [28,29].

En las raíces, se observa una mayor concentración de carbohidratos en los tratamientos control y salino, evidenciada por picos más intensos en esta región espectral. El tratamiento con prolina, por su parte, presenta solo una banda con pico de menor intensidad, sugiriendo una reducción en la síntesis o asignación de carbohidratos en este órgano.

En el tallo, el tratamiento salino presenta una banda exclusiva en 989 cm^{-1}, ausente en los demás tratamientos, además de picos más intensos en las otras bandas en comparación con el control y el tratamiento con prolina. Este patrón sugiere una acumulación diferenciada de carbohidratos en el tallo bajo estrés salino.

En las hojas, los tres tratamientos exhiben bandas similares, pero el tratamiento con prolina destaca con picos de mayor intensidad. Esto puede indicar una mayor canalización de carbohidratos hacia las hojas en este tratamiento, posiblemente para mantener el funcionamiento de la fotosíntesis bajo condiciones de estrés.

En general, el tratamiento salino parece dirigir una mayor cantidad de carbohidratos hacia las raíces y el tallo, lo que puede explicar el mayor desarrollo del sistema radicular y la mayor masa seca observados en estos órganos. El tratamiento con prolina, por otro lado, parece modular el metabolismo de carbohidratos de forma distinta, reduciendo su concentración en las raíces y aumentándola en las hojas. Esto puede reflejar el papel de la prolina como osmoprotector, posiblemente optimizando el uso de carbono para funciones fisiológicas esenciales bajo condiciones de estrés.

4.4. Alteraciones en componentes estructurales (celulosa y lignina) y su relación con la adaptación al estrés

Los picos en los números de onda de 1374, 1030 y 893 cm^{-1} son característicos de la celulosa [30-32]. El análisis de los espectros reveló patrones distintos entre los diferentes órganos de la planta y tratamientos aplicados.

En la raíz, el tratamiento con la dosis de 10 mM de prolina presentó un pico menor a 1374 y 1030 cm^{-1} en comparación con el tratamiento salino y el control. En las hojas, la banda a 1030 cm^{-1} no se observó en el tratamiento con prolina, pero fue evidente en el control y en el tratamiento salino. En el tallo, el tratamiento salino mostró un pico superior al control y al tratamiento con prolina, teniendo este último un pico próximo al control, lo que demuestra la acción osmoprotectora de la prolina.

La menor síntesis de compuestos celulósicos sugiere que la planta asignó menos carbono para la producción de estas estructuras, resultando en órganos vegetales

reducidos. Esto explica por qué el tratamiento con la mayor dosis de prolina presentó valores de raíz inferiores al tratamiento únicamente con sal.

Estos resultados corroboran las observaciones de Perrier *et al*. [33], que asociaron la reducción en la absorbancia relativa a las ligninas y celulosa con una disminución en la asignación de carbono para el crecimiento estructural, resultando en la reducción de la longitud de los órganos de la planta. Esta respuesta fisiológica puede representar una estrategia adaptativa de la planta para lidiar con el estrés salino, priorizando la asignación de recursos para otros procesos metabólicos esenciales para la supervivencia en condiciones adversas.

4.5. Cambios en el metabolismo lipídico

De acuerdo con Dubis *et al*. [34], las bandas a 2919 y 2849 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones de estiramiento asimétricas y simétricas de grupos CH_2, característicos de lípidos. Estas bandas están asociadas a hojas más hidratadas, indicando la presencia de lípidos en las membranas celulares.

Los tratamientos analizados presentaron patrones similares en estos rangos espectrales. Sin embargo, el tratamiento sometido únicamente a sal reveló una banda adicional en 2877 cm^{-1}, ausente tanto en el control como en el tratamiento con prolina. Este pico sugiere una mayor síntesis de lípidos en el tratamiento salino, posiblemente como una respuesta adaptativa al estrés osmótico o iónico causado por la sal. Se trata de un resultado acorde con la observación de la presencia, en hojas tratadas, de la banda a 1738 cm^{-1}, debida principalmente a la vibración de estiramiento C=O presente en los ésteres de los ácidos grasos que forman parte de los lípidos.

Por otro lado, el tratamiento con prolina no presentó —aparte de la aparición de la banda a 1738 cm^{-1}— otras diferencias vibracionales significativas respecto al control. Esto indica que la prolina actuó como osmoprotector, regulando el metabolismo celular y reduciendo la necesidad de mayor síntesis de lípidos. Esta acción de la prolina puede estar relacionada con su capacidad para estabilizar membranas celulares y minimizar daños oxidativos, contribuyendo al mantenimiento del equilibrio osmótico sin exigir alteraciones significativas en la composición lipídica.

4.6. Cambios en la respuesta adaptativa

El tratamiento con prolina generó incrementos en la intensidad de las bandas a 1233-1236 y 1436-1442 cm^{-1}, evidenciando modificaciones adaptativas en las plantas. La primera banda suele asociarse con vibraciones de tensión de los enlaces C-O y C-N, así como con vibraciones de flexión N-H, relacionadas con mayor síntesis

proteica (necesaria para el crecimiento foliar y formación de pigmentos fotosintéticos), aumento de compuestos fenólicos como kaempferol o quercetina (que actúan como antioxidantes que reducen el estrés oxidativo); y fosfolípidos de membrana (susceptibles de conferir, en las membranas tilacoidales, mayor estabilidad del sistema fotosintético). La segunda banda, correspondiente a deformaciones CH_2/CH_3, es típica de lípidos y ceras cuticulares (cuya presencia aumentada indicaría una mayor expansión foliar y protección contra el estrés); pero también de la cadena fitol de la clorofila (cuyo aumento justificaría); y, en menor medida, de las vibraciones de los anillos tetrapirrólico (clorofila) y pirrolidínico (propio de la prolina).

Tal como sugiere la presencia incrementada de estas bandas, el tratamiento con prolina activa los mecanismos de protección osmótica y antioxidante observados en las mejoras fisiológicas documentadas.

5. Conclusiones

El desarrollo fisiológico de *Physalis ixocarpa* frente al estrés salino evidencia mecanismos adaptativos que implican la reasignación de carbono y azúcares para procesos esenciales para la supervivencia. Entre estas respuestas, destaca la eficiencia de la aplicación exógena de prolina en las dosis de 8 y 10 mM, que promueve un aumento significativo del área foliar y contenido de clorofila, reduce el estrés oxidativo y proporciona mayor estabilidad al sistema fotosintético, conforme se observa en los análisis morfofisiológicos. Para dilucidar con precisión los mecanismos metabólicos implicados, se propone la cuantificación de prolina en raíces, tallos y hojas, permitiendo mapear su distribución y correlacionarla con la respuesta adaptativa en diferentes órganos de la planta. En relación con los análisis ATR-FTIR, los espectros han permitido poner en relación los cambios vibracionales de los grupos funcionales con las modificaciones de los componentes presentes en los diferentes órganos de la planta. La técnica ATR-FTIR emerge, así, como una herramienta estratégica para detectar alteraciones en la composición química de tejidos vegetales (hojas, tallos y raíces) en respuesta al estrés salino, identificando patrones moleculares asociados a la tolerancia, como variaciones en enlaces glicosídicos (C-O-C y C-O) y acumulación de osmolitos. Los resultados presentados no solo validan la eficacia de la prolina como mitigadora del estrés, sino que también ayudan en la selección de tratamientos optimizados para cultivos en condiciones salinas, al revelar marcadores bioquímicos vinculados a la tolerancia.

Contribución de los autores: Conceptualización, A.L.B. y M.N.N.; metodología, E.S.-H. y N.M.R.-P.; software, F.G.D.N.N. y N.M.R.P.; validación, A.L.B. y P.M.R.; análisis formal, F.G.D.N.N. y P.M.-R.; investigación, F.G.D.N.N.; recursos, M.N.N. y P.M.R.; redacción—preparación del borrador original,

F.G.D.N.N. y P.M.-R.; redacción—revisión y edición, P.M.R.; supervisión, M.N.N. y P.M.R.; obtención de financiación, M.N.N. y P.M.R. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación no recibió financiación externa.

Agradecimientos: Los autores agradecen al personal técnico de la Unidad Experimental Horto Florestal de la Universidad Estadual de Feira de Santana (UEFS, Brasil) su apoyo durante el desarrollo experimental.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Silva, D.F.; Villa, F.; Barp, F.K.; Rotili, M.C.C.; Stumm, D.R. Conservação pós-colheita de fisális e desempenho produtivo em condições edafoclimáticas de Minas Gerais. *Revista Ceres* **2013**, *60*(6), 826-832. https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/4059
2. Santiaguillo-Hernández, J.F.; Yánez, S.B. Aprovechamiento tradicional de las especies de *Physalis* en México. *Revista de Geografía Agrícola* **2009**, *(43)*, 81-86. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75715608006
3. Bock, M.A.; Sanchez-Pilcher, J.; McKee, L.J.; Ortiz, M. Characteristics of tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot.) fruits. *Journal of Food Composition and Analysis* **1995**, *8*(3), 237-243. https://doi.org/10.1007/BF01088308.
4. Khan, W.; Bakht, J.; Shafi, M. Antimicrobial potential of alcoholic extract of *Physalis ixocarpa* against some bacterial strains. *Journal of Pharmacy and Pharmacology* **2016**, *68*(1), 122-127. PMID: 27087074.
5. Maldonado, E.; Pérez-Castorena, A.L.; Garcés, C.; Martínez, M. Cytotoxic effect of physalins A and B from *Physalis solanaceus* on human cell lines. *Journal of Ethnopharmacology* **2011**, *133*(2), 434-437. https://doi.org/10.1016/j.steroids.2011.03.018.
6. Dkhil, M.A.; Al-Quraishy, S.; Abdel Moneim, A.E. Hepatoprotective and antioxidant effects of *Physalis peruviana* extract against acetaminophen-induced liver injury in rats. *Human & Experimental Toxicology* **2014**, *33*(1), 51-59. https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.09.013
7. Fischer, G.; Almanza-Merchán, P.J.; Miranda, D. Importance and cultivation of the cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura* **2014**, *36*(1), 1-15. https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13
8. Van Breusegem, F.; Vranová, E.; Dat, J.F.; Inzé, D. The role of active oxygen species in plant signal transduction. *Plant Science* **2001**, *161*(3), 405-414. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00452-6
9. Serrano, R.; Mulet, J.M.; Rios, G.; Marquez, J.A.; de Larrinoa, I.F. Salt stress and environmental physiology of plants. *Current Opinion in Cell Biology* **1999**, *11*(4), 480-490. https://doi.org/10.1104/pp.123.3.1047
10. Allakhverdiev, S.I.; Sakamoto, A.; Nishiyama, Y.; Inaba, M.; Murata, N. Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in Synechococcus sp. *Journal of Plant Physiology* **2000**, *152*(2-3), 315-322. https://doi.org/10.1104/pp.123.3.1047
11. Nankishore, A.; Farrell, A.D. The response of contrasting tomato genotypes to combined heat and drought stress. *Journal of Plant Physiology* **2016**, *202*, 75-82. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.07.006
12. Kaur, G.; Kumar, S.; Thakur, P.; Malik, J.A.; Bhandhari, K.; Sharma, K.D.; Nayyar, H. Involvement of proline in response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to chilling stress at reproductive stage. *Scientia Horticulturae* **2016**, *198*, 80-88. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.037
13. FAO. FAO Land and Plant Nutrition Management Service. **2008**. https://brasil.un.org/pt-br/152392-15-bilh%C3%A3o-de-pessoas-vivem-com-solo-salgado-demais-para-ser-f%C3%A9rtil
14. Munns, R.; Tester, M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* **2008**, *59*, 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
15. Ahmad, R., Kim, M.D., Back, KH. *et al.* Stress-induced expression of choline oxidase in potato plant chloroplasts confers enhanced tolerance to oxidative, salt, and drought stresses. *Plant Cell Rep* **27**, 687–698 (2008). https://doi.org/10.1007/s00299-007-0479-4
16. Fang, Y.; Xiong, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences* **2015**, *72*, 673-689. https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0

17. Farooq, M.; Wahid, A.; Kobayashi, N.; Fujita, D.; Basra, S.M.A. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics, pigments and volatile composition. *International Journal of Agriculture and Biology* **2012**, *14*, 761-769.
18. INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). Principales osmoprotectores. Biblioteca Digital INIA. **s.f.** https://hdl.handle.net/20.500.14001/6489
19. Wyn Jones, R.G.; Storey, R.; Leigh, R.A.; Ahmad, N.; Pollard, A. A hypothesis on cytoplasmic osmoregulation. En *Regulation of cell membrane activities in plants* **1977**, pp. 121-136. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19780774075
20. Yokoi, S.; Bressan, R.A.; Hasegawa, P.M. Salt stress tolerance of plants. *JIRCAS working report* **2002**, *25*(1), 25-33.
21. Szabados, L.; Savouré, A. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science* **2010**, *15*(2), 89-97. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009
22. Arteaga, S.; Yabor, L.; Díez, M.J.; Prohens, J.; Boscaiu, M.; Vicente, O. The use of proline in screening for tolerance to drought and salinity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Agronomy* **2020**, *10*(6), 817. https://doi.org/10.3390/agronomy10060817
23. Lichtenthaler, H.K.; Buschmann, C. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* **2001**, *1*(1), F4-3. https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01
24. Alfosea-Simón, M.; Simón-Grao, S.; Zavala-González, E.A.; Cámara-Zapata, J.M.; Simón, I.; Martínez-Nicolás, J.J.; Lidón, V.; García-Sánchez, F. Physiological, nutritional and metabolomic responses of tomato plants after the foliar application of amino acids aspartic acid, glutamic acid and alanine. *Frontiers in Plant Science* **2021**, *11*, 581234. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581234
25. Ghosh, K.; Islam, N.; Siddiqui, N.; Cao, X.; Khan, R. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. *Plant Biology* **2022**, *24*, 227-239. https://doi.org/10.1111/plb.13363
26. Shahid, S.; Shahbaz, M.; Maqsood, M.F.; Farhat, F.; Zulfiqar, U.; Javed, T.; Fraz Ali, M.; Alhomrani, M.; Alamri, A.S. Proline-Induced Modifications in Morpho-Physiological, Biochemical and Yield Attributes of Pea (*Pisum sativum* L.) Cultivars under Salt Stress. *Sustainability* **2022**, *14*, 3579. https://doi.org/10.3390/su142013579
27. Escalante Magaña, C.A. Efecto del estrés salino (NaCl) sobre el metabolismo de la prolina (Pro) y el papel de este aa suplementado de manera exógena en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Tesis doctoral. Centro de Investigación Científica de Yucatán, México. **2020**. http://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1817
28. Mitra, S.; Das, S.K. Fundamentals of ATR-FTIR Spectroscopy and Its Role for Surface Characterization. En *Surface Science Techniques* **2021**, pp. 1-20. Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-33-6084-6_1
29. Park, E.; Pino, M. Principales osmoprotectores envueltos en la respuesta a estrés hídrico y estrés térmico en papas. *Boletin INIA* **2016**, *331*, 27-36. https://hdl.handle.net/20.500.14001/6489
30. Liu, Y.; Thibodeaux, D.; Gamble, G. Fourier Transform Infrared Spectroscopic Analysis in Applied Cotton Fiber Research: A Review. *Journal of Cotton Science* **2021**, *25*, 167-179. http://dx.doi.org/10.56454/INBJ9899
31. Mihaela Topală, C.; Rusea, I. Comparative FT-IR Prospecting for Cellulose in Stems of Some Fiber Plants: Flax, Velvet Leaf, Hemp and Jute. *Applied Sciences* **2021**, *11*(18), 8570. https://doi.org/10.3390/app11188570
32. Türker-Kaya, S.; Huck, C.W. A Review of Mid-Infrared and Near-Infrared Imaging: Principles, Concepts and Applications in Plant Tissue Analysis. *Molecules* **2017**, *22*(1), 168. https://doi.org/10.3390/molecules22010168
33. Perrier, L.; Rouan, L.; Jaffuel, S.; Clément-Vidal, A.; Roques, S.; Soutiras, A.; Baptiste, C.; Bastianelli, D.; Fabre, D.; Dubois, C.; Pot, D.; Luquet, D. Plasticity of sorghum stem biomass accumulation in response to water deficit: a multiscale analysis from internode tissue to plant level. *Frontiers in Plant Science* **2017**, *8*, 1516. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01516
34. Dubis, E.N.; Dubis, A.T.; Morzycki, J.W. Comparative analysis of plant cuticular waxes using HATR FT-IR reflection technique. *Journal of Molecular Structure* **1999**, *511-512*, 173-179. https://doi.org/10.1016/S0022-2860(99)00157-X

Estimación de curvas de absorción foliar de Calcio, Magnesio y Azufre en arveja (*Pisum sativum L.*) Samacá-Boyacá-Colombia

Germán Cely[1], Pablo Serrano[2], Juan Alarcón[3],y Edilson Neira[4]

[1] Ph.D Docente Asociado.Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; german.cely@uptc.edu.co

[2] M.Sc Docente Titular.Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; pablo.serrano@uptc.edu.co

[3] Estudiante Programa Ingeniería Agronómica. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; juan.alarcon06@uptc.edu.co

[4] M.Sc Docente Ocasional tiempo completo. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; edilson.neira@uptc.edu.co

Resumen: Las leguminosas son fundamentales para la alimentación humana y animal, contribuyendo a la nutrición, salud, y al cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En Colombia, el área sembrada de arveja es de

28.079 ha, destacándose Cundinamarca, Boyacá y Nariño, con un rendimiento promedio de 1,77 Mg/ha, y 2,4 Mg/ha en Samacá (Boyacá). El manejo adecuado de la fertilización es clave para mejorar la productividad. Una investigación reveló que las absorciones máximas de calcio, magnesio y azufre en la hoja de la arveja variedad Santa Isabel fueron de 42,97 kg/ha de Ca++, 6,75 kg/ha de Mg++ y 11,18 kg/ha de S a los 132 días, con un rendimiento de 8,5 Mg/ha. Se concluyó que el calcio debe ser incorporado desde la siembra hasta las fases de cuajado y llenado para optimizar el desarrollo de la raíz. El objetivo de esta investigación fue estimar las curvas de absorción de calcio, magnesio y azufre en la arveja (*Pisum sativum L.*) bajo las condiciones edafoclimáticas de Samacá, Boyacá.

Palabras Claves: Condiciones edafoclimáticas, Leguminosas, Cambio climático.

1. Introduccion

La diversidad agrícola de las leguminosas, a nivel mundial para consumo humano y animal, sobresalen el frijol común, el garbanzo y los guisantes, aportando en la alimentación, nutrición, salud, cambio climático y la biodiversidad (FAO, 2024). Su abundancia genética, facilita seleccionar variedades adaptadas al cambio climático al tener una menor huella de carbono, las legumbres reducen de forma indirecta las emisiones de gases de efecto invernadero; como fuente de proteína, presenta un bajo consumo de agua así: 1 kilogramo de lenteja (1250 l), frente a 1 kilo de pollo (4325 l), o 1 kilo de carne de res (13.000 l),(FAO, 2021). La arveja es una

leguminosa con un rango de adaptación en el territorio Colombiano, en climas frío (2000 a 3000 msnm), temperaturas entre 13 a 18º C, su rendimiento disminuye cuando se presentan heladas a temperaturas de -1 a -2°C (DANE, 2015). Para el 2022, en Colombia el área de siembra fue de 28.079 ha y un rendimiento promedio de 1,77 Mg. ha-1; los departamentos con mayor área de siembra son Cundinamarca (8.317 ha), Boyacá (7.735 ha) y Nariño (5.758 ha); a nivel municipal Samacá en el Departamento de Boyacá es (2,4 Mg.ha-1), (MINAGRICULTURA,2022).

Uno de los factores limitantes en la productividad de la arveja, es el manejo de la fertilización; bajo el concepto de ser balanceada y fraccionada, para no afectar su rendimiento y calidad; sus requerimientos nutricionales para obtener 6 Mg.ha-1 son: N 56 Mg.ha-1, P 6 Mg.ha-1, K 25 Mg.ha-1, Ca 2,6 Mg.ha-1, Mg 6,9 Mg.ha-1, y S 1,7 Mg.ha-1, (Castro Gómez, 2010). La respuesta del rendimiento del cultivo de arveja, está dada en función de los factores ambientales, edáficos y varietales; y por ende la absorción de los nutrientes a lo largo del ciclo fenológico. La absorción de los nutrientes Calcio, Magnesio y Azufre a lo largo de un ciclo productivo, según Contreras (2002) e IFA (1992), la extracción (kg.t-1), de los nutrimentos son: nitrógeno 15, fósforo 2, potasio 7, calcio 0,7, magnesio 0,3, y azufre0,1.

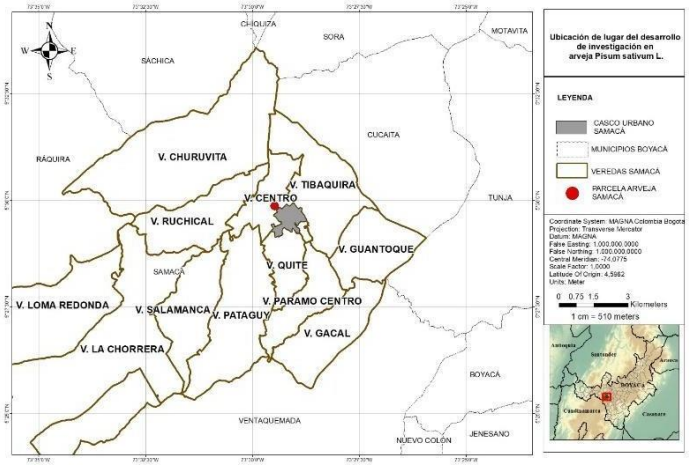
Se entiende por absorción, la cantidad total de nutrientes absorbidos por el cultivo durante su ciclo de desarrollo. El término extracción, es la cantidad total de nutrientes en los órganos cosechados, grano, forraje u otros (Ciampittiy García, 2007).

La toma de las muestras de hojas inició cuando el cultivo estaba en un 50% de germinación, y posteriormente se tomaron muestras cada 20 días, hasta llegar a la cosecha; la absorción de los tres nutrimentos (Ca++, Mg++ y S), presentó un comportamiento ascendente desde la germinación hasta llegar a la fase de cosecha, las máximas absorciones al finalizar el ciclo en la arveja (Pisum sativum L.) variedad Santa Isabel fueron: Ca++: 42,97 kg.ha-1, Mg++: 6,75 kg.ha-1,y S: 11,18 kg.ha^{-1}, a los 132 DDG, con un rendimiento de 8,5 Mg.ha^{-1}. El rendimiento está en función de interacción de los factores biofísicos (Suelo), de la planta (Genéticos) y la acción del hombre, por ende, los suelos adecuados para expresar su mejor rendimiento son: texturas Franco limosas (FL) a Franco arcillo arenosas (FArA), profundidad efectiva (45-50 cm), buen drenaje, ricos en materia orgánica, rango de pH (5.5 a 6.5), (Checa, et al, 2021). La productividad de la planta está influenciada por los factores ambientales, edáficos, varietales y por la disponibilidad de los nutrientes desde la germinación hasta el momento de la cosecha, y en especial por la disponibilidad de agua (Ríos et al., 2018). Uno de los retos actuales, es diseñar un plan de fertilización acertado que minimice

las limitantes en la toma de los nutrientes en los cultivos. La agrupación de los nutrientes de acuerdo con el tipo de funciones, Mengel y Kirkby, (2002); nutrientes que permanecen en forma iónica (calcio y magnesio); el calcio constituyente de la lámina media de las paredes celulares, cofactor por algunas enzimas involucradas en la hidrólisis del ATP y fosfolípidos, actúa como segundo mensajero en la regulación metabólica, en la arveja promueve el desarrollo de hojas y raíces, es esencial en el llenado de vainas, se mueve en la planta en una dirección que va desde las raíces hacia arriba, y es el único elemento que no se mueve hacia atrás en el floema desde las hojas a las raíces o a los frutos en desarrollo, (Marschner, 1995). El magnesio requerido por muchas enzimas involucradas en la transferencia de grupos fosfato, constituyente de la molécula de la clorofila, su deficiencia puede afectar el rendimiento, al reducir la tasa fotosintética. Otras funciones de importancia en el metabolismo vegetal, incluye la síntesis de proteínas, la síntesis y activación de compuestos de ATP de alta energía y la partición de carbohidratos dentro de la planta (Marschner, 1995). El azufre de acuerdo al tipo de función, forma parte de los elementos que forman compuestos orgánicos; biosíntesis de: aminoácidos azufrados (cisteína, cistina y metionina), y de la proteínas; constituyente del ácido lipoico, formación del acetilcoenzina A, tiamina pirofosfato, glutatión, biotina, (Mengel y Kirkby, 2002). Los estudios de curvas de absorción de nutrientes son herramientas que ofrecen información (Datos) más certeros que asimila un cultivo durante su ciclo fenológico, ayudan a conocer la cantidad mínima requerida por un cultivo enfocado en mejorar e incrementar un rendimiento determinado. Ajustando los diferentes programas de fertilización, obtener mayores rendimientos y disminuir los costos en aplicación de fertilizantes, (Panduro, 2015), se trata de una representación gráfica de la absorción de nutrientes por las plantas en función del tiempo (Hernán, 2017).

2. Materiales y Métodos

El proyecto de investigación se desarrolló en el municipio de Samacá, vereda Centro Departamento de Boyacá, ubicada a 05º 29´ 45,5" latitud norte y 73º 29´32,8" longitud oeste, a una altitud de 2.500 msnm, entre los meses de diciembre y abril de 2022; Figura 1. La información climática fue generada de la estación agroclimática móvil Vantage Pro2 Plus (Davis Instruments, Hayward, CA); adicionalmente, la información climática se comparó con la generada a partir de la Estación de hidroclimatologíca El Carmen (Samacá), así como con valores histórico



(Figura 1: Localización municipio Samaca)

La caracterización físico química del suelo, se extrajeron tres muestras de suelo a una profundidad de 0 a 20 cm, y anillos de volumen descritos por Cooper et al. (2017). La acidez intercambiable se corrigió aplicando dolomita, se aplicó en dosis de 2,5 t ha-1, antes de la siembra, (Tabla 1). Se estableció un plan de fertilización con los resultados reportados en el análisis químico del suelo y según las siguientes extracciones para arveja en kg.ha-1: 125 N, 68 P2O5, 70 K2O, 52 CaO, MgO 30, SO4 6,3, B 0,4 y Zn 0,7. Las aplicaciones de fertilizantes químicos para siembra y a los 30 días después de germinación, se distribuyeron lateralmente al suelo (Tabla 2).

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del suelo

pH	MO	Ac. Int	Al^{+3}	Ca	Mg	K	Na	SB	CIC_E
	%	$cmol^+ kg^{-1}$ de suelo							
4,57	4,68	5,00	4,60	3,95	1,39	0,74	0,76	6,84	11,84
P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	A	L	Ar
$mg\ kg^{-1}$							%		
202,0	242,1	194,9	6,48	0,16	1,57	0,47	22	21	57
ES	DA	PT	Macro	Meso	Micro	CHS	CC	PMP	
$g\ cm^{-3}$		%				$cm\ h^{-1}$	%	%	
	1,2	50,47	8,3	16,81	25,68	0,34	43,24	28,93	

pH: relación 1:1; materia orgánica (MO): Walkley-Black; acidez extraíble (Exc. Ac.): titulación; aluminio intercambiable (Al+3): KCl 1N; Ca-K-Mg-Na: extracto NH4 y absorción atómica; saturación de bases (BS) – suma de bases; capacidad efectiva de intercambio catiónico (ECEC): extraer NH4; fósforo disponible (P): Bray II, colorimetría; azufre (S): fosfato monocálcico; Cu-Fe-Mn-Zn: extracto de DTPA: absorción atómica; boro (B): agua caliente; textura: Bouyoucos: arena (% A), arcilla

(% Ar) y limo (%L); extracto de saturación (SE); densidad aparente (DA); anillo de volumen conocido; porosidad (Pt), macroporos (Marco), mesoporos (Meso), microporos (Micro); saturado conductividad hidráulica (SHC): permeámetro de cabeza constante de laboratorio; capacidad de campo (FC) y punto de marchitez permanente (PWP): ollas a presión.

Tabla 2. Fertilización (kg·ha^{-1}) aplicado para el cultivo de la arveja (*Pisum sativum* L.).

Aplicación	N	P2O5	K20	CaO	MgO	S	B	Zn	Cu	Fecha
Siembra	55,8	28,6	12,0	53,6	15,5	2,4	1,3	2,3	0,1	23/11/2021
Reabone	42,0	12,0	69,0	9,0	12,0	6,0	0,3	0,3	0,1	25/01/2022
Total	97,8	40,6	81,0	62,6	27,5	8,4	1,6	2,6	0,2	-

El material establecido fue arveja variedad Santa Isabel, la fecha de siembra 21 de noviembre del año 2021, área experimental de 6.000 m2, El diseño experimental correspondió a parcelas en submuestreos, con promedios con intervalo de confianza para cada época. La cantidad de semilla sembrada fue 50 kg.ha-1 a chorrillo, con una distancia de siembra de 1,10m x 0,10m, con sistema tutorado. Se realizó el manejo fitosanitario durante el desarrollo del cultivo, garantizando el manejo integrado de plagas, enfermedades y arvenses.

El material foliar se inició a recolectar aleatoriamente cuando el cultivo presentaba más del 50% de emergencia, y a los 60, 82 y 112 días después de la siembra, se obtuvieron 120 g de tejido en fresco para llevar al laboratorio; teniendo en cuenta la siguiente metodología en arveja: se colectó la segunda o tercera hoja completamente desarrollada en la parte superior de la planta., los resultados de la información se llevó al componente estadístico teniendo en cuenta los promedios con intervalos de confianza ($\propto$=0,05).

El secado del material vegetal se realizó a 65°C durante aproximadamente 4 a 5 días dependiendo de la especie; el molido de la muestra se realizó en molino automático a 3500 rpm hasta conseguir un diámetro de partícula menor a 0.5 mm.

La determinación para el Magnesio y Calcio, se pesó 0.35g de muestra seca y molida, se dispuso en un tubo Taylor donde se adicionan 5 ml de solución de ácido nítrico y ácido perclórico en relación 2:1, se dejaron en pre digestión toda la noche, al día siguiente se realizó el montaje de las muestras en el bloque digestor previamente calentado a 200°C durante aproximadamente 45 minutos a 1 hora o hasta realizar la digestión completa, se dejó enfriar la muestra y se lleva a volumen de 35 ml con

agua destilada para posteriormente ser procesado en el equipo de absorción atómica, (Magnesio: se usó llama con mezcla de aire-acetileno; y Calcio se usó llama con mezcla de aire y óxido nitroso).

Para el análisis de azufre se pesaron 0.35g de muestra seca y molida, se dispuso en un tubo Taylor donde se adicionaron 5 ml de solución de ácido nítrico y ácido perclórico en relación 2:1, se dejó en pre digestión toda la noche, al día siguiente se realizó el montaje de las muestras en el bloque digestor previamente calentado a 200°C durante aproximadamente 45 minutos a 1 hora o hasta realizar la digestión completa, se dejó enfriar la muestra y se llevó a volumen de 35 ml con agua destilada para posteriormente tomar 5ml de la solución resultante, después se le adiciona 5 ml de agua destilada, 10 ml de solución semilla y 4 ml de solución de gelatina con cloruro de bario, se dejó en reposo por 30 min y se procedió a leer en espectrofotómetro uv-vis a 420nm.

El cálculo de la curva de absorción foliar de cada nutrimento se obtuvo de la concentración de los elementos en las hojas y su peso; el rendimiento se determinó a partir de la densidad de siembra (plantas.ha-1) y producción.

Los datos obtenidos de las variables de respuesta en las unidades de muestreo fueron sometidas a análisis de diagrama de Box-plot y análisis de homogeneidad de varianza a través de la Versión del software R 4.0.1.

3. Resultados y Discusiones

Las condiciones promedio del clima en la zona en este periodo (Noviembre 2021 – abril 2022) fueron: La distribución del agua (Aplicada y precipitación mm) 385,2 mm; la temperatura máxima 20.11 °C, temperatura mínima 9.5 °C, temperatura promedio 14.1 ºC, humedad relativa, 87.6% en promedio, y evapotranspiración 67,23 mm.

El comportamiento de la precipitaciones en el periodo comprendido entre los meses de noviembre 2021 a abril de 2022, comparado con el promedio histórico, fue similar al mismo periodo con los meses de noviembre, marzo y abril; el resto de meses: diciembre, enero y febrero, presentaron una precipitación superior al promedio histórico: diciembre 82,2mm, enero 8 mm y febrero 62 mm; siendo el mes de marzo el que presenta la precipitación más alta (141,1 mm). La temperatura máxima fue en el mes de noviembre (21,27 ºC), siendo superior al promedio de la últim

década (2010 - 2019, 19,29 ºC); a su vez la temperatura mínima fue en enero (8,2 ºC), siendo superior al promedio de la misma década (7,44 ºC), (Figura 2).

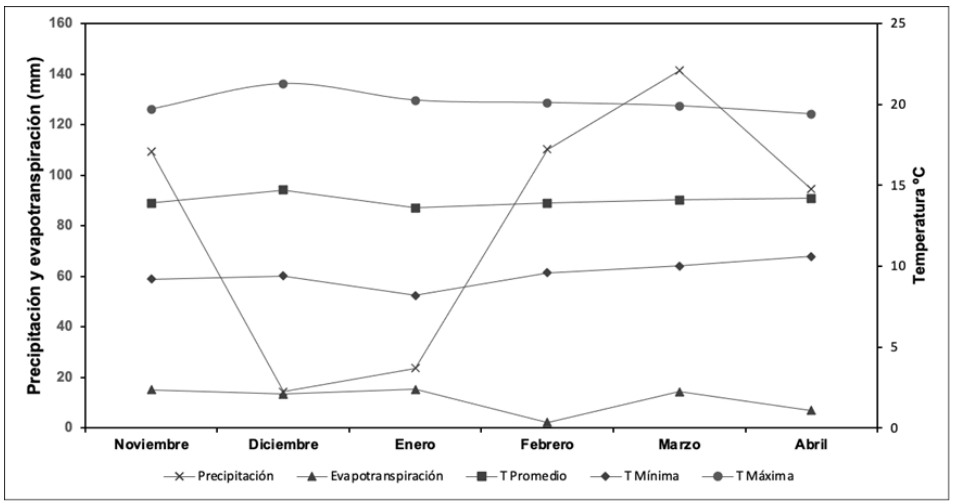


Figura 2. Precipitación, evapotranspiración y temperatura durante el crecimiento vegetativo.

La distribución de los poros del suelo antes de que se produjera el proceso de labranza mostró, porosidad total 48,2%, 28,81 % microporos, 14,27 % mesoporos y 5,12% de macroporos. Galvis (2016) cita que un equilibrio dinámico entre la fase sólida, liquida y gaseosa del suelo, aunque se puede estimar que un mínimo de 50% de porosidad total, distribuido en 12 - 15% de macroporos, 25 - 30% de mesoporos y 12 - 15 % de microporos; el suelo presenta una mayor proporción de microporos superior al 20%, y una baja proporción de macroporos inferiores al 12,7%.

La distribución de materia seca en los componentes de la planta fueron: materia seca de raíces 0,25 Mg ha-1, materia seca de hojas 2,74 Mg ha-1 y materia seca de vainas 4,31 Mg ha-1, finalizando con una acumulación total de materia seca de 7,39 Mg ha-1, (Figura 3); Estrada (2010), reporta en Sumpango Sacatepéquez (Guatemala), una acumulación de materia seca total a los 100 días después de la siembra en arveja China variedad Atitlan de 6,52 Mg ha-1, siendo inferior a la acumulación del presente trabajo de investigación.

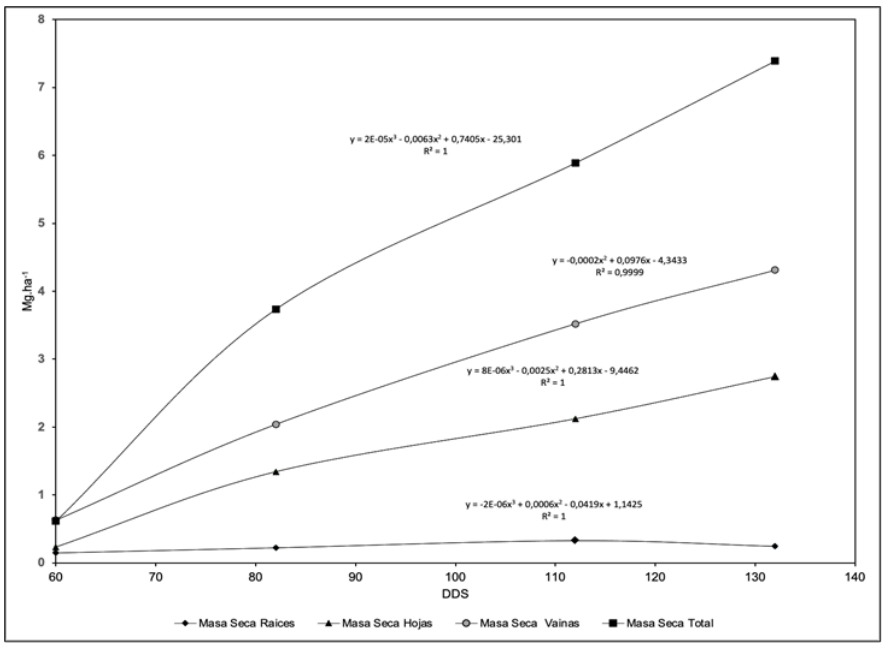


Figura 3. Distribución de la materia seca en arveja (Pisum sativum L.), Materia seca total, Materia seca raíces, Materia seca hojas, Materia seca vainas, (Mg.ha-1).

El rendimiento al final de la cosecha fue de 8,54 Mg ha-1 en fresco (Vaina verde) con una población de 53.500 plantas ha-1, supera a los rendimientos comerciales nacionales en vaina verde según Fenalce (2016), los cuales están entr y 8 Mg. ha-1 bajo tutorado; MADR (2023), reporta rendimientos en Colombia de 2,42 Mg. ha-1, a nivel del departamento Nariño con 3,25 Mg. ha-1, siendo inferiores a los obtenidos por el presente trabajo de investigación. La acumulación biomasa inició desde la floración hasta el fin de la cosecha (82 a 132 dds), se puede deducir que una planta que alcance una mayor acumulación de biomasa en el período de floración dará un mayor rendimiento (Soto et al., 2009). El Índice de cosecha que presentó fue de 21,1%, está por debajo a los reportados por Fageria et al. (2010), en leguminosas está entre el 30 y 35%; se explicaría porque las plantas al llegar a la floración, pueden no ser fecundadas en su totalidad (Caída de flor), por daños de plagas o patógenos, o por el manejo de cosecha manual.

La Figura 4, explica la tendencia en la absorción de Calcio, Magnesio y Azufre en el follaje, expresado kg.ha-1, durante el ciclo vegetativo, desde la siembra hasta el final de cosecha en el cultivo de arveja Variedad Santa Isabel (Pisum sativum L.), con una población de 53.500 plantas.ha-1.

El comportamiento de absorción del Calcio presenta un crecimiento ascendente y constante desde la germinación hasta finalizar la cosecha, siendo superior a la absorción de Magnesio y Azufre; durante el desarrollo vegetativo (0- 59 DDS) la absorción fue de 2,8 kg.ha-1; continúa con el crecimiento para llegar a la etapa de floración e inicio de formación de vaina (82 DDS) con una absorción de 17,6 kg.ha-

1; continúa la fase de cuajado y llenado de vainas (112 DDS) presentando un comportamiento ascendente y considerable absorción de 26,7 kg.ha-1; al llegar a la fase final de cosecha (132 DDS) obtiene la mayor absorción de Calcio llegando a 42,97 kg.ha-1; con un rendimiento de 8,5 Mg.ha-1.

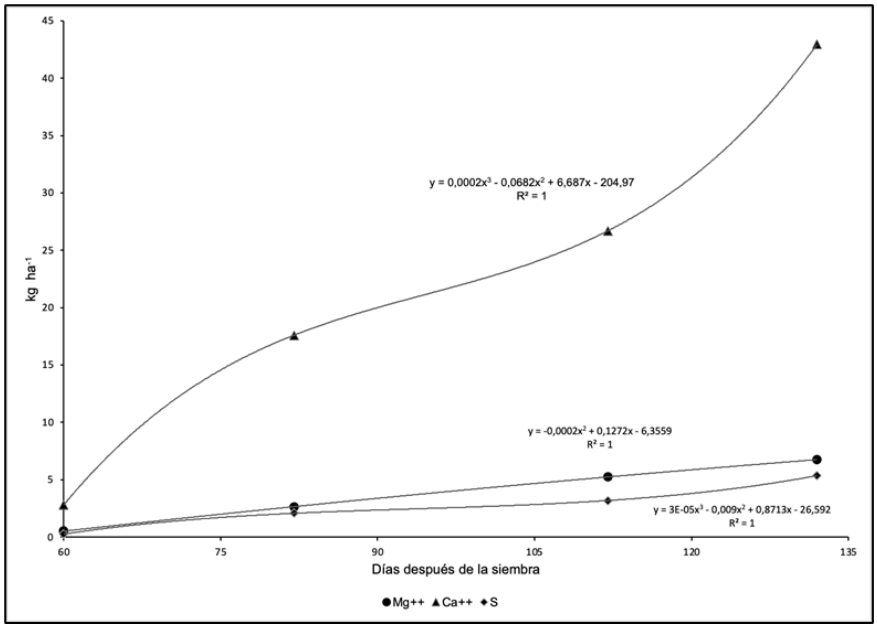


Figura 4. Curvas de absorción foliar de Calcio, Magnesio y Azufre (kg.ha-1) para el cultivo de arveja (Pisum sativum L.) en Samacá.

***Nota**: Ca^{++} Calcio, Mg^{++} Magnesio y S Azufre.*

Lata-Tenesaca et al. (2016), reportaron en fríjol a los 76 DDS, en la etapa cuajado y llenado de vainas de esta leguminosa, la máxima absorción foliar de Calcio de 30 kg.ha-1, con rendimiento comercial de 2.91 Mg.ha-1, presenta un similar comportamiento de la tasa de absorción de Calcio para la misma fase en el presente trabajo de investigación de arveja en Samacá a los 132 DDS (26,7 kg.ha-1). Estrada (2010), reporta en Sumpango Sacatepéquez (Guatemala), una acumulación de Calcio de 76,4 kg ha-1, a los 100 días después de la siembra en arveja China variedad Atitlan, siendo superior a los obtenidos en el presente trabajo de investigación, la explicación se debe a que la localidad en Guatemala está a una altitud de 1800 msnm y temperatura media de 19 ºC.

En relación al Magnesio, Figura 4, su comportamiento de absorción fue moderado, inferior a la de Calcio y superior a la de Azufre; durante la primera fase (Desarrollo vegetativo, 59 DDS) la absorción fue de 0,52 kg.ha-1, llega a la etapa de floración e inicio de formación de vaina (82 DDS) con una absorción de 2,6 kg.ha-1; continúa con la fase de cuajado y llenado de vainas (112 DDS) obteniéndose una absorción de 5,26 kg.ha-1; en la fase final de cosecha (132 DDS), finaliza la absorción con una tendencia creciente de 6,75 kg.ha-1.

Lata-Tenesaca et al. (2016), determinaron en fríjol un comportamiento de absorción de Magnesio a lo largo del ciclo similar al de la Figura 4, con una máxima absorción foliar de Magnesio de 5,8 kg.ha-1, con rendimiento comercial de 2.91 Mg.ha-1, siendo inferior al obtenido en el presente trabajo de investigación. Estrada (2010), reporta en Sumpango Sacatepéquez (Guatemala), una acumulación de Magnesio de 14,2 kg ha-1, a los 100 días después de la siembra en arveja china variedad Atitlan, siendo superior a los obtenidos en el presente trabajo de investigación.

El comportamiento para el Azufre en la Figura 4, tiene una tendencia de absorción foliar inferior al Calcio y Magnesio, presenta un leve crecimiento ascendente y lineal desde la germinación hasta finalizar la cosecha; durante el desarrollo vegetativo (0-59 DDS) la absorción fue de 0,25 kg.ha-1; continúa con una acumulación creciente para llegar a la etapa de floración e inicio de formación de vaina (82 DDS) con una absorción de 2,48 kg.ha-1; continúa la fase de cuajado y llenado de vainas (112 DDS) para una absorción de 3,09 kg.ha-1; al llegar a la fase final de cosecha (132 DDS) obtiene la mayor absorción de Azufre llegando a 5,36 kg.ha-1; obteniendo a una absorción de Azufre total en el follaje de 11,18 kg.ha-1. Zhao et al. (2002), reporta una absorción total de Azufre en arveja de 15 kg.ha-1 y en guisantes de 14,6 kg.ha-1; así mismo una absorción en el follaje 6,3 kg ha-1, tallo y raíz de 6,5 kg ha-1; valores que se aproximan a los obtenidos en el follaje total de Azufre para la arveja en este trabajo de investigación

4. Conclusions

Las máximas absorciones en la hoja de los nutrientes Calcio, Magnesio y Azufre en el ciclo de la arveja (*Pisum sativum L.)* variedad Santa Isabel fueron de Ca++: 42,97 kg.ha-1, Mg++: 6,75 kg.ha-1,y S: 11,18 kg.ha-1, a los 132 DDS, con un rendimiento de 8,5 Mg.ha-1.

Determinar en el ciclo fenológico de la arveja (Pisum sativum L), la dinámica de la absorción de los tres nutrientes, (Calcio, Magnesio y Azufre), es una herramienta valiosa para determinar los momentos de mayor absorción y por ende la planificación de las épocas de aplicación en un programa de nutrición edáfica.

Tener en cuenta en los planes de fertilización, los momentos a aplicación para el Calcio, debido al papel que juega dentro en el desarrollo de la raíz (Multiplicación celular, crecimiento celular, neutralización de los hidrogeniones y vital en poscosecha); por tal razón se debe incorporar al suelo desde la siembra hasta la fase de cuajado y llenado.

References

1. Castro, H., y Gómez, M. (2010). Fertilidad de suelos y Fertilizantes. En: Ciencia del suelo. Principios Básicos. Eds. Mojica y Burbano. Ed. Guadalupe S.A. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. p.263.
2. Ciampitti, I.A. y García, F. (2007). Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. II. Hortalizas, frutales y forrajeras. Revista de Informaciones Agronómicas No 33. Disponible: http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/$ FILE/AA%2012.pdf. Julio de 2016.
3. Checa, O., Daniel, C., Rodríguez, M., Marco, R., Ruiz, H., Jesús, E., Figueroa, E. M., Marino, D., Rodríguez, R., Ruiz, M. H., Marco, E., Muriel, J. E., & Jesús, F. (2021). *LA ARVEJA Investigación y Tecnología en el Sur de Colombia*. Ed. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. p.142.
4. Contreras, A. 2002. Ecofisiología del rendimiento de la planta de papa. 3.er SeminarioInternacional de la papa, Medellín, Colombia.
5. DANE. (2017). Características relevantes en el cultivo de la zanahoria (Daucus carota L .) en Colombia y estudios de caso sobre costos de producción en los municipios de Madrid (Cundinamarca) y Ventaquemada (Boyacá). Boletín Mensual INSUMOS FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN
6. AGROPECUARIA.https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jun_2017.pdf
7. Dezordi, L., Angelo de Aquino, L., Batista de Almeida, R., Clemente, J. y Silva N. (2016). Diagnostic Methods to Assess the Nutritional Status of the Carrot Crop. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. v40:e0140813.
8. Estrada, M. (2010), Diagnóstico general y servicios prestados en la empresa "Grupo hortícola de exportación" y determinación de curvas de Absorción de nitrógeno (n), fósforo (p), y potasio (k) en arveja china (Pisum sativum var Atitlán), Sumpango, Sacatepéquez. https://es.scribd.com/document/373994815/Absorcion-de- Nutrimentos-de-Arveja-Chinahttps://es.scribd.com/document/373994815/Absorcion-de-Nutrimentos-de- Arveja-China
9. Fageria, N., Baligar, V., & Clark, R. (2010). CRC PRESS Physiology of Crop Production (2006) (Routledge).
10. FAO, (2021). Dia mundial de las legumbres 10 de febrero.
11. https://www.fao.org/assets/infographics/pdfimg/IYP-Pulses-Facts-infographic-es.jpg
12. FAO, (2024). Producción y protección vegetal. La FAO celebra el día mundial de las legumbres 2024. https://www.fao.org/plant-production-protection/news-and-events/news/news-detail/fao-celebrates-world- pulses-day-2024/en
13. Galvis, J. (2016). Evaluación de la estabilidad estructural y el espacio poroso en un Typichaplustox isohipertérmico caolinítico de sabana, bajo el efecto de tres tipos de labranza y tres sistemas de producción. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela de Posgrados. Palmira, Colombia.
14. Hanlon E, Hochmuth G. Carrot. In: Campbell Ray C. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. Raleigh: 2009. p.63-4. (Southern Cooperative Series Bulletin, 394).
15. Hernán, S. (2017). Curvas De Absorción De Nutrientes: Importancia Y Uso En Los Programas De Fertilización. Obtenido De Curvas De Absorción De Nutrientes: Importancia Y Uso En Los Programas De Fertilización: Http://186.3.32.121/Bitstream/48000/3006/8/8.%20%20estructura%20de%20contenido.Pdf.
16. International Fertilizer Industry Association (IFA). 1992. World fertilizer use manual. Paris, France. p. 37-550.
17. Lata-Tenesaca, L., Villaseñor-Ortiz, D., y Chabla-Carrillo, J. (2017). Fraccionamiento de la absorción de nutrientes en cuatro etapas fenológicas del cultivo de fréjol. Universidad y Sociedad [seriada en línea], 9 (1),
18. pp. 20-27. Recu- perado de http://rus.ucf.edu.cu/
19. León, P., Gómez, A., Migenes, M., y Llanes, V. (2013). Comparación de profundidades de Labranza Reducida y Siembra Directa con y sin humus de lombriz en el cultivo de la zanahoria. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *22*(3), 42–45.
20. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2a ed. AP, Londres.

21. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). Reporte: Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4.
22. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Reporte: Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4
23. Panduro, N. (2015). Dinámica De La Absorción De Los Nutrientes Y Metales Pesados En La Biomasa Estacional Del Cultivo De Camu Camu (Myrciariadubiahbk), En un Entisols de Yarinacocha. Tingo María –Perú: Universidad Nacional Agraria De La Selva
24. Ríos, L., Correa, J. F., Rojas, C. A., y Dorado, D. Y. (2018). Caracterización edafoclimática de la zona productora de lima ácida Tahití (Citrus latifolia Tanaka) en el Tolima (Colombia), afectada por una fisiopatía Edaphoclimatic characterization of theproductive zone of Tahiti lime (Citrus latifolia Tanaka). *Corpoica Cienc TecnolAgropecuaria*, *19*(3), 545–567.
25. Sediyama, M., Mollica, S.,Gómez, P., Pinheiro, N., y De Lima, P. (1998). Yield and mineral composition of carrots fertilized with organic residues. Bragantia, De Lima P. 57 (2): 1998. 379 – 386p.
26. Soto, F.; Plana, R. y Hernández, N. (2009). Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas del trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp. Aestivum) y triticale(x *Triticum secale* Wittmack) y su relación con el rendimiento. Cultivos Tropicales, 2009, vol. 30, no. 1, p. 57-60.
27. Zhao, F., McGrath, S., Blake-Kalff, M., Link, A., y Tucker, M. (2002). Crop responses to sulphur fertilization in Europe. Proceedings No. 504, International Fertiliser Society, York, UK. Pp 1.26.

Knowledge Transfer for Sustainable Agriculture: Insights from the TANGO Circular Project

Vasco Cruz[1], José Rico[2], Diogo Coelho[2] and Fátima Baptista[1]

MED – Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal. fb@uevora.pt (FB); vfc@uevora.pt

MED – Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Institute for Advanced Studies and Research, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal. diogojrc@uevora.pt (DC)

* Correspondence: jcsr@uevora.pt

Abstract: Knowledge transfer plays a fundamental role in the capacity building of professionals and in strengthening the agri-food sector, promoting the dissemination of best practices and technological innovations in a structured, accessible, and territory-adapted manner. In this context, the TANGO Circular project, funded by the Erasmus+ program, has made a significant contribution to this process by providing free, specialized training to different target audiences. Developed by a multidisciplinary consortium that includes the University of Évora as a partner, TANGO Circular focuses on the implementation of circular economy practices in agriculture. The training is offered in a hybrid format, both in-person and online, and is structured in modules covering topics such as sustainable agricultural waste management and the use of agro-environmental technologies. The main objective is to equip farmers, technicians, and other sector professionals with practical and up-to-date skills, promoting a more efficient, resilient, and sustainable agriculture. This initiative reinforces the role of education as a driver of innovation, contributing to the adoption of sustainable solutions and to the valorization of resources within the agricultural sector.

Keywords: training; sustainability; circular economy

1. Introduction

Knowledge transfer is a critical factor for the modernization and sustainable development of the agri-food sector. In an era of rapid technological advances and environmental challenges, the dissemination of best practices, technological innovations, and sustainable approaches is crucial for empowering farmers and other stakeholders. This enables them to strengthen their capacities, increase production efficiency, and adapt more effectively to contemporary challenges, such as climate change, resource depletion, and the growing demand for sustainable agricultural practices [1]. The need for a well-trained workforce in the agri-food sector is more pressing than ever, as professionals must not only be proficient in traditional farming techniques but also in modern technologies that enhance productivity while reducing environmental impact [2].

Investment in the training and qualification of agricultural professionals has emerged as one of the primary strategies to increase the sector's resilience and competitiveness. This is especially true in the face of global challenges such as climate change, shifting consumer preferences, and the increasing importance of sustainable practices [1,2]. Such investments are essential for ensuring that farmers and industry stakeholders are equipped with the knowledge and skills needed to make informed decisions, optimize resource use, and foster sustainable farming practices.

In this context, projects that promote capacity building through digitalization and structured education have become increasingly relevant. The use of e-learning platforms, hybrid methodologies, and accessible educational materials allows farmers and rural producers to access training that was previously unavailable to them due to geographical or time constraints. Moreover, these initiatives foster the development of collaborative networks, enabling knowledge exchange and the sharing of best practices among various actors in the sector. This approach is particularly important for rural areas, where access to formal education and training is often limited, and where digital solutions can bridge the gap between urban and rural knowledge dissemination [3].

To address these needs, numerous funding and innovation support programs have been established to promote training and knowledge transfer in the agri-food sector. European Union programs such as Erasmus+ play a pivotal role in financing initiatives aimed at improving education and professional development in strategic areas, such as sustainable farming practices, digitalization, and the circular economy [4]. These programs have become essential for supporting the implementation of innovative methodologies and ensuring that knowledge transfer occurs in a structured, accessible, and impactful way.

The TANGO Circular project is one such initiative that exemplifies these efforts. As part of the Erasmus+ program, TANGO Circular focuses on providing training to farmers and other stakeholders in the agri-food sector, with a specific emphasis on waste valorization and the circular economy. The project addresses critical areas of agricultural waste management, offering training modules designed to equip participants with the necessary skills to adopt sustainable practices and reduce waste across the supply chain [5]. Additionally, the project's incorporation of "Rural Labs" – practical learning spaces – provides participants with the opportunity to apply the knowledge gained in real-world settings, further enhancing the effectiveness of the training [6]. The online training component of TANGO Circular ensures that these educational resources are accessible to a wider audience,

reaching professionals across regions and making it easier for them to integrate sustainable practices into their operations.

By focusing on the circular economy and the valorization of agricultural waste, TANGO Circular plays a crucial role in the transformation of the agri-food sector. It contributes significantly to the development of sustainable practices that can help mitigate the sector's environmental impact while also improving economic outcomes for farmers and other stakeholders. As the need for sustainability in agriculture grows, initiatives like TANGO Circular are essential in driving the transition towards a more sustainable, resource-efficient, and resilient agri-food sector [7].

2. TANGO Circular Project

The TANGO Circular (Training A New Generation Of farmers and agricultural entrepreneurs) is an Erasmus+ project aimed at training workers and stakeholders in the agricultural sector in circular economy practices [2]. The project seeks to identify innovative solutions for the sustainable management of agricultural surpluses, promoting their valorization and contributing to the reduction of the carbon footprint.

More than just a training initiative, TANGO Circular aims to guide farmers and sector agents in adopting strategies that transform surpluses into new economic opportunities, fostering sustainable growth and ensuring the effective implementation of circular economy principles.

The project is developed by a consortium of 13 partners across five European countries: Spain, France, Greece, Italy, and Portugal. In Portugal, it involves the participation of AJAP - the Association of Young Farmers of Portugal, the University of Évora, and CIMAC - the Intermunicipal Community of Central Alentejo, which play a crucial role in its implementation. Among the key initiatives in the country is the creation of a Rural Laboratory, where demonstration and training activities are promoted.

Training

The project follows a hybrid training model, combining in-person and online components to maximize learning and the applicability of the content. Each training module has a total duration of 8 hours, distributed as follows: 2 hours of in-person training, 2 hours of demonstration in the Rural Laboratories, 2 hours of training in the Rural Laboratories, and 2 hours of online component.

Over its three-year duration, Tango has proposed the completion of three training cycles. The goal is to train a total of 250 farmers and 50 stakeholders per country, totaling 1000 farmers and 200 stakeholders, promoting the adoption of sustainable practices in the agri-food sector.

To ensure the quality and consistency of the training, the project partners developed a set of educational materials that serve as the foundation for the training. These materials are structured into nine modules (Table 1), focusing on key topics for sustainability in the agri-food sector. During each training cycle, participants have access to the content of these modules. The materials are available in English and the official languages of the project partner countries (Portuguese, Greek, Spanish, French, and Italian), ensuring greater accessibility for participants. The nine modules developed within the project cover fundamental aspects of sustainable waste management in the agri-food sector.

Table 1. Modules of the TANGO Circular Project

Module	Title
01	Classification of agricultural biomass
02	Valorization of agricultural biomass
03	Valorization of agro-food co-products, byproducts and organic residuals
04	Classification of agricultural plastic waste
05	Collection, transportation and recycling of agricultural plastic waste
06	De-contamination and valorization of agricultural plastic packaging waste
07	Waste & biomass legislation
08	Environmental, territorial and economic planning, associated with each form of valorization
09	Advantages and disadvantages of valorisation techniques of agricultural by-products

To support the online component of the training, an asynchronous e-learning platform was developed (Figure 1), allowing participants to access the content anytime and anywhere [5]. The platform provides study materials for download, including documents, presentations, and videos; interactive resources for in-depth exploration of the topics covered; tools for sending messages, facilitating communication between participants and trainers; and a space for knowledge sharing and collaboration among registered users. This virtual environment aims to make the training more accessible, dynamic, and tailored to the needs of agricultural sector professionals, reinforcing the project's commitment to innovation and sustainability.

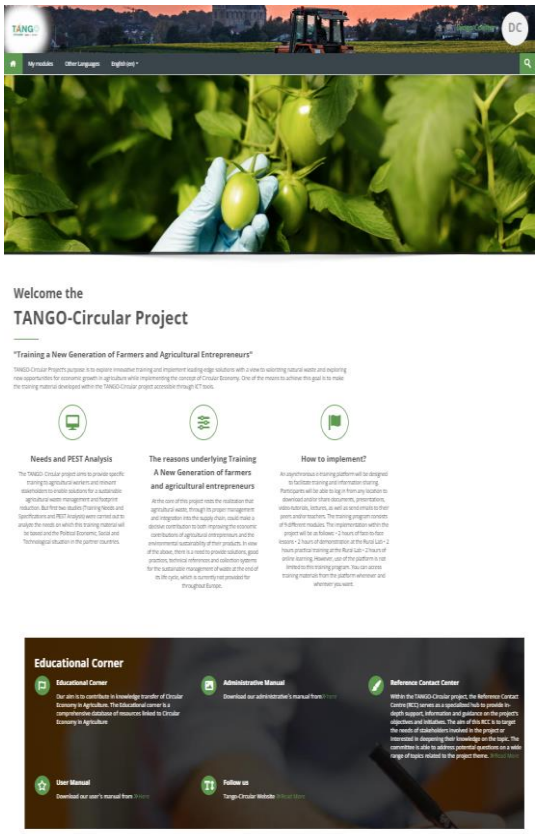


Figure 1. Interface of the TANGO Circular e-learning platform

Training in Portugal

In Portugal, the implementation of the training cycles followed a structured approach, where the nine modules were organized into three thematic groups: biomass, plastics, and legal framework. Based on the content of the modules, the distribution in the thematic groups was as follows: a) Biomass: M1. Classification of agricultural biomass, M2. Valorization of agricultural biomass, M9. Advantages and disadvantages of valorisation techniques of agricultural by-products; b) Agricultural plastics: M4. Classification of agricultural plastic waste, M5. Collection, transportation and recycling of agricultural plastic waste, M6. De-contamination and valorization of agricultural plastic packaging waste; c) Legal Framework: M3. Valorization of agro-food co-products, byproducts and organic residuals, M7. Waste e biomass legislation, M8. Environmental, territorial and economic planning, associated with each form of valorization.

With the thematic groups defined, the training sessions were held in different locations throughout each cycle, following a 3x3 factorial model. This approach allowed the identification of regions in central and southern Portugal with greater relevance to each theme, ensuring the practical contextualization of the content; adapting the training activities to local characteristics, considering factors such as the predominance of certain agricultural crops and harvest schedules or agro-

industrial transformation processes; and adjusting the schedule to the availability of farmers, facilitating their participation in the face-to-face sessions.

This methodology ensured more efficient and applied training, enabling participants to acquire knowledge directly related to the agricultural realities of their regions. In addition to the theoretical and practical approach to the different project themes, the training cycles were enriched with a dynamic schedule of activities, including testimonials and the sharing of experiences by farmers, entrepreneurs, and other professionals from the agri-food sector.

The main results of the thematic training cycles, organized with a dynamic schedule, reflected the involvement and interest of the audience, totaling 519 participants across the three cycles, a number higher than anticipated in the project. Overall, the legal framework theme stood out, with 46% of participants, followed by biomass with 30% and agricultural plastics with 24%, as observed in Table 2.

Table 2. Number of participants per round and thematic group

	Number of participants		
	Biomass	Agricultural plastics	Legal framework
1st round	30	33	86
2nd round	68	39	67
3rd round	59	49	88
Total	157	121	241

3. Conclusions

The TANGO Circular project highlights the importance of accessible and well-structured training for promoting sustainability and innovation in the agri-food sector. Its hybrid methodology, use of digital platforms, and creation of Rural Laboratories have proven effective in bringing knowledge closer to farmers and other stakeholders. The strong participation in the training cycles carried out in Portugal reflects the relevance of the topics and the adaptability of the training model to different regional contexts. The content covered and the interactive nature of the sessions contributed to a better understanding of the practices associated with the circular economy. TANGO Circular has shown that initiatives focused on knowledge transfer can have a real impact on the way professionals approach sustainability in agriculture. More than transmitting information, the project created spaces for dialogue, collaboration, and practical learning, reinforcing the role of education as a driver of change in the sector.

Author Contributions: Conceptualization, V.C., F.B., J.R. and D.C.; Investigation, V.C., F.B., J.R. and D.C; Writing – original draft, V.C., F.B., J.R. and D.C.; Writing – review & editing, V.C., F.B., J.R., D.C.; Supervision, V.C. and F.B.; Project administration, V.C. and F.B.; Funding acquisition, V.C. and F.B.

Funding: This work was supported by the Erasmus+ Program of the European Union (Project: 101055970 — TANGO-Circular — ERASMUS-EDU-2021-PI-ALLINNO); and National Funds through FCT – Foundation for Science and Technology under the Project UIDB/05183.

Acknowledgments: The authors acknowledge to the partners in the TANGO Circular project; and MED (https://doi.org/10.54499/UIDB/05183/2020; https://doi.org/10.54499/UIDP/05183/2020) & CHANGE (https://doi.org/10.54499/ LA/P/0121/2020).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Picuno, P., Puglisi, R., Spyrou, G., Dimitriou, E., Papadakis, G., Smirniotaki, M., ... & Margout-Jantac, D. (2023). Training farmers on Circular economy implementation: the TANGO-Circular Project. In Proceedings of the 49th Symposium" Actual Tasks on Agricultural Engineering" (Vol. 1, pp. 517-525). Igor Kovačev, Mateja Grubor.
2. European Commission. Knowledge alliances. Erasmus+, 2020. Knowledge alliances. Erasmus+. European Commission, 2020. https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/opportunities/knowledge-alliances_en. (accessed on 11/03/2025)
3. Baptista F.J., Rico J.C., Coelho D.J.R., Barbosa M., Cruz V.F. (2023). NEGHTRA & TANGO – Training projects for the new generation of farmers and agricultural entrepreneurs. MED Meeting 2023 - Healthy soils, for food, for life and for the future. 3rd – 4th July 2023, Évora, Portugal.
4. TANGO Circular. E-learning Platform. Available online: https://tangocircularproject-vle.eu/ (accessed on 11/03/2025)
5. FAO. The digital transformation of agriculture, FAO, 2020. https://www.fao.org/agroecology/database/detail/en/c/1709301/. (accessed on 22/04/2025)
6. European Commission. Training for agriculture in the digital era, 2020. https://www.fao.org/platforms/green-agriculture/areas-of-work/cross-cutting-areas/science-and-innovation/en. (accessed on 22/04/2025)
7. Erasmus+. Capacity Building in Higher Education, 2021. https://erasmus-plus.ec.europa.eu/programme-guide/part-b/key-action-2/capacity-building-higher-education. (accessed on 22/04/2025)

PARTE 12

ENERGIA

ENERGÍA

Índice

Temperatura de ignición del polvo de pellets de pino 1323

¿Los orujos de vinificación desecados son un material con riesgo de explosión? 1330

Using solar energy in large irrigation systems: insights from a benchmark study about irrigation networks in southern Spain 1338

Análisis, diseño y cálculo de la instalación de un alumbrado inteligente en sistemas agrovoltaicos en un cultivo de patata 1353

Integración de paneles fotovoltaicos dispuestos verticalmente con cultivos de secano en la Península Ibérica 1362

Agrivoltaica en el entorno periurbano de Pamplona para mejorar la relación entre la ciudad y el campo 1371

Reutilización de paneles solares de segunda vida en sistemas agrivoltaicos 1382

Temperatura de ignición del polvo de pellets de pino

Alberto Tascón[1,*], Alejandro Varela[1] y F. Javier García-Ramos[2]

1 Dpto. Agricultura y Alimentación, Universidad de La Rioja, España; alberto.tascon@unirioja.es, alejandro.varela-del@unirioja.es

2 Escuela Politécnica Superior-Huesca, Universidad de Zaragoza, España; fjavier@unizar.es

* Correspondencia: alberto.tascon@unirioja.es

Resumen: Los pellets de madera son un combustible que se utiliza para producir energía térmica y/o eléctrica. Sin embargo, el almacenamiento y manejo de grandes cantidades de biomasa tiene asociados riesgos, como incendios y explosiones. Estos fenómenos se ven agravados por la acumulación del polvo generado durante el manejo de los pellets. En este estudio se ha analizado la ignición de capas de polvo de pellets de madera de pino. Para ello, se han realizado ensayos utilizando una placa metálica caliente con temperatura controlada. Los ensayos se han realizado para dos tipos de pellets comerciales, para dos fracciones granulométricas diferentes de cada tipo de pellet y para tres espesores distintos de la capa de polvo. Además, cuatro muestras fueron adicionalmente ensayadas con compactación previa. Los resultados obtenidos indican que la temperatura mínima de ignición siempre crece con el espesor de la capa, que las fracciones más finas tienen una temperatura más baja en la mitad de los ensayos, y que sólo un 25% de las muestras compactadas vieron modificada su temperatura. Este estudio proporciona información que puede ayudar a diseñar medidas de prevención que reduzcan la probabilidad de ignición en instalaciones industriales.

Palabras clave: biomasa; incendio; combustión; tamaño de partícula; compactación

1. Introducción

La biomasa en forma de pellets es un combustible que se utiliza para producir electricidad y/o calor, tanto a nivel residencial como industrial. Es una manera de disminuir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y generar actividad económica en zonas rurales, aprovechando al mismo tiempo recursos que, si se gestionan adecuadamente, son renovables y reducen las emisiones netas de gases de efecto invernadero [1]

Sin embargo, el almacenamiento y manejo de grandes cantidades de biomasa tiene asociados ciertos riesgos, como incendios y explosiones [2,3]. Estos fenómenos se ven agravados por la generación de polvo durante el manejo de los pellets. Las acumulaciones de polvo pueden sufrir procesos de ignición al estar en contacto con una fuente de calor externa durante un tiempo determinado.

La temperatura mínima que debe tener una superficie caliente para producir la ignición de una capa de polvo depende del tipo de biomasa y también del espesor de la capa; a mayor espesor, menor temperatura [4,5]. También el grado de compactación de la capa influye en la temperatura de ignición, pero el efecto de esta variable es menos conocido y parece que existen diferencias según el tipo de biomasa y su granulometría [4].

En este trabajo se ha determinado la temperatura de ignición de capas de polvo de pellets de madera de pino y se ha analizado el efecto del espesor y de la compactación. El objetivo era obtener nueva información que pueda ayudar a diseñar medidas de prevención que reduzcan la probabilidad de ignición en instalaciones reales.

2. Metodología

En este trabajo se han utilizado dos tipos de pellets de madera de pino, disponibles comercialmente y ambos de calidad A1. Por un lado, pellets fabricados a partir de troncos, que son descortezados, astillados y secados, para posteriormente ser molidos y peletizados sin adición de ninguna sustancia. Por otro lado, pellets elaborados a partir de serrín de pino procedente de la industria maderera. En ambos casos, los fabricantes utilizan mayoritariamente la especie *Pinus Sylvestris*.

De cada material se ensayaron dos fracciones granulométricas para así poder estudiar el efecto del tamaño de partícula. Las muestras se trataron mediante un molino de martillos GME-1100C de Garhé (Amorebieta, España) de 1,8 kW que llevaba incorporada una criba de 2 mm. Para obtener las fracciones más finas se utilizó una batidora de tamices eléctrica del fabricante Controls (Milán, Italia) con tamices circulares de acero con abertura 250 µm y 400 µm. Finalmente, las muestras ensayadas fueron cuatro: en el caso de los pellets procedentes de troncos (PT), se utilizó material molido de tamaño <2000 µm (identificado como muestra PT<2000) y polvo <250 µm (muestra PT<250); y en el caso de los pellets elaborados a partir de serrín (PS), se usó el material molido de tamaño <2000 µm (muestra PS<2000) y polvo <400 µm (muestra PS<400).

El equipo utilizado para los ensayos de ignición, desarrollado por el Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Zaragoza, se corresponde con el diseño propuesto en la norma ISO/IEC 80079-20-2 [6]. Consiste en una placa metálica horizontal calentada mediante resistencias eléctricas regulables embutidas en su interior sobre cuya superficie se coloca un anillo metálico de diámetro 100 mm, dentro del cual se dispone la muestra a ensayar. Se utilizaron anillos de 5 mm, 10 mm y 20 mm de altura para estudiar el efecto del espesor de la capa.

Una vez que la placa alcanzaba la temperatura deseada, se rellenaba el anillo con la muestra de polvo a analizar y se enrasaba. Luego se mantenía la muestra a temperatura constante durante un tiempo y se observaba si se cumplía algunos de los siguientes tres criterios, que indican que ha habido ignición [6]: presencia de llamas o incandescencia, temperatura 250 °C superior a la placa, o temperatura en la muestra ≥ 450 °C. El ensayo se detuvo en el momento que se observaba ignición; en caso contrario, se mantenía durante 30 minutos (para capas de 5 mm), 1 hora (para 10 mm) o 2 horas (para 20 mm). Si no se produjo ignición durante ese tiempo, se repetía el ensayo para una temperatura 10 °C superior y, así sucesivamente, hasta un máximo de 400 °C. En el caso de ignición, el ensayo se repetía para una temperatura 10 °C inferior para verificar si había o no ignición y, si se producía ignición, se volvía a reducir la temperatura otros 10 °C hasta poder verificar la no ignición. La temperatura mínima de ignición se confirmó mediante 2 repeticiones. Cada ensayo se realizó con muestra nueva.

La temperatura se controló con dos termopares: un sensor medía la temperatura de la superficie de la placa (termopar tipo K de disco de cobre, rango de -10 °C a +480 °C, de TC-Direct), mientras que otro sensor se situó dentro de la muestra a una distancia de al menos 2 mm por encima de la placa para medir la temperatura que alcanzaba el interior del material (termopar tipo K de hilo fino, rango de -100 °C a +800 °C, de TC-Direct) . Los valores de temperatura se registraron cada 10 segundos mediante un *data-logger* portátil (Thermometer SE-520 de TC-Direct) y un ordenador.

Además de los ensayos convencionales, se realizaron algunos ensayos con las muestras PS compactando la capa de polvo. Para ello, nada más colocar la capa de polvo en la placa caliente, se disponía sobre ella una placa metálica y un peso de 1,4 kg durante 5 segundos. Posteriormente, se retiraba el peso y la placa, y se añadía más material si era necesario con el objeto de mantener constante la altura de capa en todos los ensayos. A partir de ese momento, se continuaba el ensayo de la manera habitual.

3. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de ignición en capa.

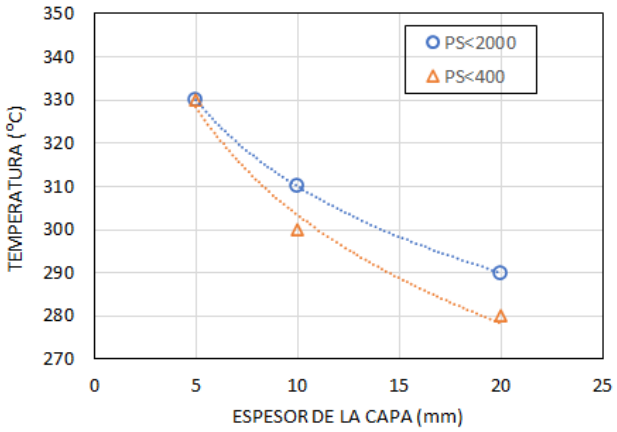


Figura 1. Temperatura mínima de ignición del polvo de pellets de serrín de pino (PS) e influencia del espesor de la capa.

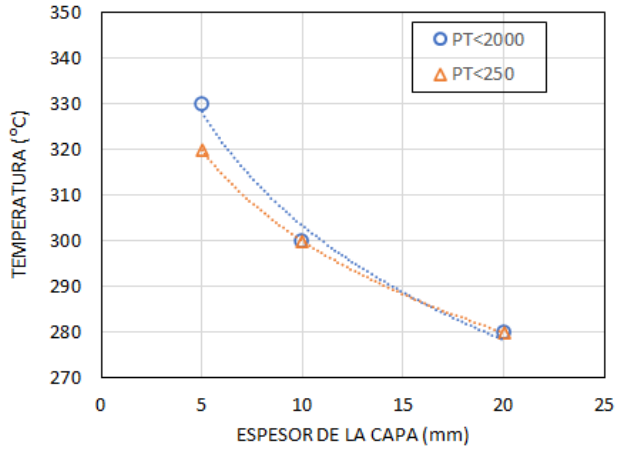


Figura 2. Temperatura mínima de ignición del polvo de pellets de tronco de pino (PT) e influencia del espesor de la capa.

La Figura 1 ilustra los resultados para las muestras de polvo de pellets fabricados a partir de serrín (PS) considerando distintos espesores, mientras que la Figura 2 presenta los resultados obtenidos para los pellets fabricados directamente a partir de troncos de árboles (PT). Además de estos resultados, también se ensayaron algunas muestras compactadas, cuyos valores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación entre la temperatura mínima de ignición (°C) de muestras compactadas (se indican con "+c") y la de muestras no compactadas de polvo de pellets de serrín de pino.

Espesor	PS<2000	PS<2000 +c	PS<400	PS<400 +c
10 mm	310	310	300	300
20 mm	290	280	280	280

4. Discusión

Los resultados obtenidos indican que el espesor de la capa hace disminuir la temperatura mínima de ignición. Esta tendencia se cumple en todos los casos, independientemente del tipo de pellets (PS o PT) y de la granulometría de la

muestra, y coincide con lo descrito previamente por otros investigadores [7]. Además, las líneas de ajuste que se muestran tanto en la Figura 1 como en la Figura 2 son de tipo logarítmico, lo cual concuerda con el modelo de ignición de Frank-Kamenetskii [8], y muestran muy buena aproximación.

En el caso de las muestras PS, se puede observar en la Figura 1 que la temperatura disminuye con el espesor de manera más pronunciada para la muestra más fina (PS<400); sin embargo, no se observaron diferencias entre las dos muestras para el espesor inicial de 5 mm, lo cual difiere de otros trabajos previos [4].

Por el contrario, para las muestras PT, sucede justo lo contrario: la muestra más fina presentó una temperatura más baja para espesor de 5 mm, pero los resultados finalmente convergieron para un espesor de 20 mm al tener mayor pendiente la curva correspondiente a la granulometría más gruesa. Esta convergencia de muestras de diferente granulometría según aumenta el espesor de la capa se puede observar también en los resultados publicados por Fernandez-Anez y Garcia-Torrent para pellets y astillas [4] y también en los de Val-Aguasca *et al*. [5] para polvo de trigo en cosechadoras.

En cuanto a la compactación, los resultados de la Tabla 1 indican que únicamente en el caso de la muestra PS<2000 se observó una variación de la temperatura: la ignición se vio favorecida por la compactación. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Fernandez-Anez y Garcia-Torrent para diversas biomasas [4]. Tanto ese trabajo previo [4] como el presente estudio sugieren que la temperatura de ignición puede variar o no con la compactación, dependiendo del material y de la fracción granulométrica, pero que, en cualquier caso, su efecto es pequeño en el caso de biomasas.

Los datos obtenidos permiten proponer algunas recomendaciones preliminares para el manejo de estos materiales: debe evitarse la acumulación de polvo mediante instalaciones y rutinas de limpieza adecuadas, ya que el espesor y la compactación de la capa pueden disminuir notablemente la temperatura a la que se produce la ignición (disminución entre 40 °C y 60 °C al pasar de 5 mm a 20 mm según los resultados obtenidos); si hay una limpieza adecuada, la temperatura máxima de superficies donde pueda acumularse polvo (motores, equipos, etc.) debería limitarse al menos a 245 °C, que se corresponde con la temperatura más desfavorable obtenida en este estudio (320 °C para 5 mm de PT<250) considerando un margen de seguridad de 75 °C según la norma UNE-EN 60079-14 [9]; para polvo de granulometría más fina que ≤ 250 µm o para condiciones en las que no pueda asegurarse que las acumulaciones de polvo no superarán los 5 mm, será necesario reducir más dicha temperatura máxima (si es posible, deben tomarse muestras

reales en las condiciones más desfavorables en la instalación industrial concreta y analizarlas).

El conjunto de resultados de este trabajo coincide, en líneas generales, con los resultados previos que se pueden encontrar en la literatura científica. Sin embargo, existen ciertas discordancias entre los dos materiales empleados que convendría estudiar con mayor profundidad, para verificar si se deben a diferencias entre las muestras (composición, forma y tamaño de las partículas) o si se pueden explicar simplemente por el alto grado de incertidumbre propio de estos ensayos, como ha apuntado Restuccia *et al*. [10].

5. Conclusiones

Se ha determinado la temperatura de ignición de capas de polvo de dos tipos de pellets de pino y para dos fracciones granulométricas de cada uno de ellos mediante un equipo de placa caliente, analizando también el efecto del espesor de la acumulación de polvo para tres espesores diferentes. Además, dos muestras fueron también utilizadas para comprobar el efecto de compactar la capa antes del ensayo utilizando para ello dos espesores diferentes de capa.

Todas las temperaturas de ignición determinadas se encontraron en el rango comprendido entre 280 °C y 330 °C. La probabilidad de ignición aumentó en todos los casos para mayores espesores de capa, aumentó para granulometrías más finas (en la mitad de los casos: 3 de 6) y aumentó si la muestra estaba compactada (en un 25% de los casos: 1 de 4 muestras). Los datos obtenidos en este trabajo tienen consecuencias prácticas para el manejo de riesgos en instalaciones industriales reales.

Estos resultados, al igual que trabajos previos por otros investigadores, indican la necesidad de investigar con mayor profundidad el efecto del tipo de material y la granulometría de la muestra en la temperatura mínima de ignición y su variación con el espesor de la capa.

Contribuciones de autoría: Conceptualización, A.T.; metodología, A.T, A.V. y J.G-R.; análisis formal, A.T y A.V.; investigación, A.V. y J.G-R.; recursos, A.T y J.G-R.; redacción—borrador original, A.T.; redacción—revisión y edición, A.T, A.V. y J.G-R.; administración del proyecto, A.T.

Financiación: Esta investigación es parte del proyecto PID2023-149732NB-I00 financiado por MCIU/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE. También se agradece el contrato predoctoral para la formación de personal investigador (Alejandro Varela) y la ayuda a la movilidad predoctoral para la realización de estancias breves, ambos financiados por la Universidad de La Rioja, Banco Santander y Comunidad Autónoma de La Rioja.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI, de la Universidad de Zaragoza, por el desarrollo y mantenimiento del equipo de ensayo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. AVEBIOM. Decálogo por el desarrollo y la consolidación del sector de la bioenergía en España; Asociación Española de la Biomasa: Valladolid, España, 2023.
2. Ramírez, Á.; García-Torrent, J.; Tascón, A. Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos. J. Hazard. Mater. 2010, 175, 920–927.
3. Castells, B.; Varela, A.; Castillo-Ruiz, F.J.; Calvo, L.F.; Medic, L.; Tascón, A. Ignition and explosion characteristics of olive-derived biomasses. Powder Technol. 2023, 420, 118386.
4. Fernandez-Anez, N.; Garcia-Torrent, J. Influence of particle size and density on the hot surface ignition of solid fuel layers. Fire Technol. 2019, 55, 175–191.
5. Val-Aguasca, J.P.; Videgain-Marco, M.; Martín-Ramos, P.; Vidal-Cortés, M.; Boné-Garasa, A.; García-Ramos, F.J. Fire risks associated with combine harvesters: Analysis of machinery critical points. Agronomy 2019, 9, 877.
6. ISO/IEC 80079-20-2, Explosive Atmospheres – Part 20-2: Material Characteristics – Combustible Dusts Test Methods; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016.
7. Bowes, P.C.; Townshend, S.E. Ignition of combustible dusts on hot surfaces. Brit. J. Appl. Phys. 1962, 13, 105–114.
8. Quintiere, J.G. Fundamentals of Fire Phenomena; John Wiley & Sons: Chichester, England, 2006.
9. UNE-EN 60079-14, Atmósferas explosivas – Parte 14: Diseño, elección y realización de las instalaciones eléctricas. Asociación Española de Normalización y Certificación: Madrid, España, 2016.
10. Restuccia, F.; Fernandez-Anez, N.; Rein, G. Experimental measurement of particle size effects on the self-heating ignition of biomass piles: Homogeneous samples of dust and pellets. Fuel 2019, 256, 115838.

¿Los orujos de vinificación desecados son un material con riesgo de explosión?

Alberto Tascón [1,2,*], Blanca Castells [3,4], Isabel Cuadrado-Galera [1], Alejandro Varela [1,2], Jose M. Peña [1] y Julia Arbizu-Milagro [1]

[1] Dpto. Agricultura y Alimentación, Universidad de La Rioja, España.

[2] Centro de Investigación Aplicada y Multidisciplinar del Vino y de la Agroalimentación (CIVA), Universidad de La Rioja, España.

[3] Dpto. de Energía y Combustibles, Universidad Politécnica de Madrid, España.

[4] Laboratorio Oficial José María de Madariaga (LOM) y Centro Tecnológico de Seguridad y Calidad en Industrias Energéticas y Minas (TECMINERGY), Getafe, España.

* Correspondencia: alberto.tascon@unirioja.es

Resumen: Los orujos de vinificación son enviados a las industrias alcoholeras, que obtienen distintos productos de gran valor añadido. Sin embargo, estos residuos son también una biomasa que presenta potencial como fuente de energía. En el caso de que se vayan a manejar y almacenar grandes volúmenes de este material es necesario considerar los posibles riesgos asociados a incendios y explosiones. En este estudio se han secado orujos de vinificación procedentes de uva Tempranillo y de uva Graciano hasta alcanzar distintos grados de humedad (4%-30%) y se han analizado sus propiedades de ignición y explosividad. Los resultados indicaron que estos materiales, para ese rango de humedades y un tamaño de partícula aproximado de d_{50} = 500 µm, presentan un riesgo bajo, aunque sí serían necesarias algunas precauciones para su correcto manejo. Formando una capa sobre una superficie caliente, los orujos presentaron una inflamabilidad similar a otras biomasas y materiales agroalimentarios, mientras que dispersos en forma de nube de polvo tuvieron una inflamabilidad inferior. En ambos casos, capa y nube, los orujos de Graciano presentaron mayor facilidad de ignición que los de Tempranillo. Ninguna muestra mostró ignición ante chispas eléctricas. La severidad de explosión fue baja, alcanzándose sobrepresiones ≤ 6 bar.

Palabras clave: biomasa, combustión, ignición, seguridad, partículas de polvo, incendios, explosiones, bodegas

1. Introducción

Los residuos de vinificación formados por los hollejos y pepitas de las uvas (orujos) son enviados a las industrias alcoholeras, en las que se obtienen distintos productos de gran valor añadido [1]. Sin embargo, estos residuos son también un potencial recurso energético que puede resultar interesante en escenarios de escasez de energía, altos precios o requerimientos estrictos de disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en la producción vitivinícola. En este estudio se ha

planteado la posibilidad de que estos residuos, tras un proceso de secado, puedan ser utilizados como combustible en la propia bodega o en otras industrias o instalaciones próximas. Por otro lado, las industrias alcoholeras ya utilizan los orujos agotados como fuente de energía, una vez extraído el etanol y otras sustancias [1].

Según los resultados presentados por Weng *et al*. [2], los orujos secos presentan algunas propiedades interesantes para su combustión, con un tiempo de ignición corto, una baja producción de partículas de hollín y un poder calorífico elevado (poder calorífico superior = 21,2 MJ/kg, poder calorífico inferior = 20,1 MJ/kg).

Sin embargo, si estos materiales se van a almacenar y manejar en grandes cantidades para su posterior uso energético, es necesario considerar los posibles riesgos relativos a incendios y explosiones. Los residuos agrícolas y alimentarios son conocidos por desencadenar incendios y explosiones cuando no se almacenan o manejan adecuadamente [3,4].

Este material es poco conocido en relación a los riesgos relacionados con fenómenos de combustión. Los únicos datos disponibles son los publicados por Portarapillo *et al*. [4]. El objetivo del presente estudio fue obtener información adicional que pueda servir de guía al sector en el caso de que los orujos de vinificación se utilicen como fuente de energía renovable.

2. Metodología

2.1. Preparación de las muestras

Los materiales ensayados en este trabajo han sido orujos de vinificación procedentes de uvas tintas de las variedades Tempranillo y Graciano. Las uvas (40 kg de Tempranillo y 40 kg de Graciano) fueron recogidas manualmente en parcelas acogidas a la DOCa Rioja situadas dentro del término municipal de Logroño y fueron tratadas en los laboratorios de la Universidad de La Rioja: se despalillaron manualmente, se sometieron a microvinifición en recipientes de 4,0 litros –el presente estudio se realizó de manera suplementaria a un proyecto de investigación más amplio en vitivinicultura– y, una vez terminadas las fermentaciones, se procedió al prensado mediante una prensa de tornillo manual (Maquinaria Vinícola Saénz de Cabezón, Logroño).

La pasta húmeda así obtenida (orujos) fue dividida en varias fracciones. El objetivo era estudiar el efecto de la humedad en el riesgo que presenta este tipo de material. El secado de los orujos aumenta su densidad energética y puede ser interesante en usos industriales para favorecer su almacenamiento, transporte y combustión [5], pero también podría aumentar los riesgos de accidente [6]. Con este fin, por tanto,

se prepararon muestras con distinto grado de humedad mediante el secado de fracciones del orujo húmedo inicial en una estufa a 90 °C. Posteriormente, todas las muestras secadas fueron molidas y tamizadas con un tamiz de abertura 1 mm.

En el Laboratorio Oficial José María de Madariaga se realizaron los ensayos de ignición y explosión que se detallan en los siguientes apartados. El contenido de humedad de cada muestra se determinó justo antes de realizar los ensayos mediante un analizador halógeno (HB43-S de Mettler Toledo), mientras que la granulometría se midió mediante difracción láser (Mastersizer 2000 de Malvern Instruments). La Tabla 1 muestra las características de las 9 muestras utilizadas en este estudio. Para cada una de ellas, se indica el contenido de humedad calculado en base húmeda (H) y la granulometría expresada como d_{50} o mediana de la curva de distribución de partículas.

Tabla 1. Identificación y características de las muestras analizadas.

Nº	Variedad	H (%)	d_{50} (µm)
T1	tempranillo	3,71	505
T2	tempranillo	7,50	562
T3	tempranillo	7,69	562
T4	tempranillo	8,63	485
T5	tempranillo	29,95	660
G1	graciano	3,43	402
G2	graciano	4,24	402
G3	graciano	7,32	504
G4	graciano	7,85	505

2.2. Ensayos de inflamabilidad

Se obtuvieron los siguientes parámetros de sensibilidad a la ignición o inflamabilidad:

- Temperatura mínima de ignición en capa (*TMIc*): Es la temperatura más baja a la que se produce la ignición de una capa de polvo dispuesta dentro de un anillo metálico de diámetro 100 mm y altura 5 mm sobre una superficie metálica calentada mediante una resistencia eléctrica durante un tiempo de 30 minutos. La temperatura se mide tanto en la superficie metálica como en el interior de la muestra. La temperatura del ensayo se va aumentando o reduciendo de 10 °C en 10 °C hasta encontrar la temperatura más baja en la que se registra una temperatura dentro del material superior a la temperatura de la placa, o en la que se observan llamas o brasas.
- Temperatura mínima de ignición en nube (*TMIn*): Es la temperatura más baja a la que se produce la ignición de una mezcla polvo/aire con la concentración más inflamable. Se determina en el horno vertical Gobert-Greenwald, que

consiste en un cilindro metálico calentado a una temperatura que se puede fijar, dentro del cual se dispersa una cantidad conocida de polvo mediante una corriente de aire presurizado. La temperatura, la presión del aire y la cantidad de polvo son modificados hasta encontrar la temperatura más baja a la que se detecta visualmente ignición de la nube de polvo. Dicha temperatura, restando 20 °C para temperaturas de ensayo > 300 °C y 10 °C para temperaturas ≤ 300 °C, es el valor de *TMIn*.

- Energía mínima de inflamación (*EMI*): Este parámetro se obtiene en el aparato de ensayo MIKE3, que consiste en un tubo vertical transparente en el que se sitúan 2 electrodos enfrentados conectados a un condensador. La muestra se sitúa en el fondo del equipo y es dispersada por una corriente de aire desde un recipiente presurizado. La energía aplicada se calcula a partir de la capacidad del circuito de descarga y de la tensión aplicada. La energía mínima de inflamación se determina a partir de la energía E_1, para la que no se produce ignición en 10 ensayos consecutivos con la mezcla polvo/aire más inflamable, y la menor energía E_2 a la que se produce ignición en alguno de los 10 disparos consecutivos [8]. El ensayo se detiene si no se obtiene inflamación para una energía de 1000 mJ.
- Estos tres parámetros están normalizados. Una descripción más completa de los procedimientos de ensayo y los correspondientes equipos de laboratorio puede encontrarse en la norma europea EN ISO/IEC 80079-20-2 [9]. La utilidad de estos valores consiste en su aplicación en análisis de riesgos de instalaciones industriales para estimar la probabilidad de ignición, así como en el diseño de medidas de prevención contra incendios y explosiones. Por ejemplo, las *TMIn* y *TMIc* sirven de referencia para controlar las temperaturas de procesos y superficies calientes con el objeto de evitar la ignición del material, ya sea material depositado en una capa o material dispersado formando una nube de polvo; por otro lado, la *EMI* sirve de referencia para el control de posibles fuentes de ignición, incluyendo chispas eléctricas, chispas mecánicas y descargas electroestáticas [8].

2.3. Ensayos de explosividad

Los parámetros de severidad de explosión o explosividad se determinan en un recipiente esférico de 20 litros, conectado a un sistema de dispersión de polvo mediante aire presurizado y en el que se disponen dos cerillas químicas de 10 kJ en total que se puede activar mediante un circuito eléctrico. El retardo entre la dispersión del polvo y la activación de la ignición es de 60 ms. La esfera cuenta con un sensor de presión. Los ensayos se repiten para varias concentraciones, en el rango 125—1500 g/m^3, para así poder determinar los valores más desfavorables que corresponden a la mezcla más explosiva.

A partir de las curvas presión-tiempo registradas por el sensor durante los ensayos, se calculan los siguientes parámetros normalizados:

- Presión máxima de explosión ($P_{máx}$): Es la máxima sobrepresión, para la concentración más desfavorable, que produce la combustión de una nube de polvo en un recinto cerrado. Se expresa como presión relativa en bares.
- Velocidad máxima de aumento de presión de explosión ($(dP/dt)_{máx}$): Es la máxima pendiente de la curva presión-tiempo registrada, para la concentración más desfavorable, durante la combustión de una nube de polvo en un recinto cerrado.
- Índice característico del polvo (K_{St}): Es la velocidad máxima de aumento de presión normalizada, calculándose como el producto de $(dP/dt)_{máx}$ y la raíz cúbica del volumen en el que se ha realizado el ensayo de explosión. En el caso de que el recipiente fuera de 1 m^3 coincidiría numéricamente con el valor de $(dP/dt)_{máx}$. Este índice permite clasificar la severidad de explosión en cuatro categorías: St0 si no hay explosión (K_{St} = 0 bar·m/s), St1 indica explosión débil (K_{St} de 1 a 200 bar·m/s), St2 explosión fuerte (K_{St} de 201 a 300 bar·m/s) y St3 explosión muy fuerte (K_{St} > 300 bar·m/s).

Estos ensayos disponen de procedimientos normalizados. La descripción completa de la metodología y del equipo de ensayo de 20 litros utilizados en este estudio pueden encontrarse en la norma EN 14031-1 [10] para $P_{máx}$ y en la norma EN 14032-2 [11] para $(dP/dt)_{máx}$ y K_{St}.

Estos parámetros se utilizan en el diseño de sistemas de protección contra explosiones, tales como el venteo [12] o la supresión [13], así como en los análisis de riesgos para valorar las posibles consecuencias de un accidente de explosión.

3. Resultados

Los resultados obtenidos para los distintos parámetros de inflamabilidad, así como el contenido de humedad de cada muestra, se presentan en la Tabla 2. Los valores ">1000" en *EMI* y ">800" en *TMIn* significan que no se produjo inflamación de la muestra para ese valor, que fue el máximo para el cual se realizaron los ensayos. Por su parte, la Tabla 3 recoge los resultados de severidad de explosión obtenidos para cuatro muestras de material.

Tabla 2. Inflamabilidad de distintas muestras de orujos ordenadas según variedad de uva y humedad.

Nº	H (%)	TMIc (°C)	TMIn (°C)	EMI (mJ)
T1	3,71	330	670	>1000
T3	7,69	360	700	>1000
T5	29,95	330	>800	>1000
G1	3,43	300	640	>1000
G3	7,32	320	720	>1000

Table 3. Explosividad de distintas muestras de orujos ordenadas según variedad de uva y humedad.

Nº	H (%)	$P_{máx}$ (bar)	$(dP/dt)_{máx}$ (bar·s^{-1})	K_{St} (bar·m·s^{-1})
T2	7,50	5,9	128,9	35
T4	8,63	5,9	117,9	32
G2	4,24	4,5	62,6	17
G4	7,85	0	0	0

4. Discusión

Los resultados obtenidos indican que los orujos de uva tienen una baja sensibilidad a la ignición por chispa, no habiéndose encontrado ninguna muestra que se inflamara para valores de energía ≤ 1000 mJ. Esto es positivo desde el punto de vista de la seguridad, ya que indica una reducida probabilidad de ignición accidental. No obstante, esta conclusión es válida para las combinaciones de humedad y tamaño de partícula ensayados en este trabajo (todas las muestras tenían un valor d_{50} de aproximadamente 500 µm). Si las condiciones fueran distintas, por ejemplo, si las partículas fueran más finas, la ignición se vería favorecida y podrían aparecer valores de *EMI* más bajos.

Por otro lado, este material tiene una sensibilidad moderada a la ignición producida por superficies calientes. En el caso de nubes de polvo, la temperatura de ignición varió entre 670 °C y >800 °C para orujos de Tempranillo o entre 640 °C y 720 °C para Graciano, dependiendo del contenido de humedad de la muestra; a mayor humedad, mayor *TMIn*. Estos valores son, en general, muy superiores a los correspondientes a muestras de madera o de otros materiales agrícolas y alimentarios [14]. Por el contrario, en el caso de depósitos de material en forma de capa, las temperaturas de ignición alcanzaron valores entre 300 °C y 360 °C, que son habituales para otras biomasas, como el serrín de madera o el polvo de pellets de madera [14]; en este caso la humedad no mostró una influencia clara en los resultados. Los datos obtenidos parecen indicar que los orujos de Graciano presentan una *TMIc* ligeramente más baja que los de Tempranillo.

En general, los ensayos de temperatura indican que los orujos de Graciano se inflaman más fácilmente cuando están en contacto con una superficie caliente que los orujos de Tempranillo, tanto en forma de capa como en forma de nube de polvo.

En cuanto a la severidad de explosión, los datos indican que este material podría explotar, pero daría lugar a una explosión débil si la comparamos con otros materiales agrícolas y alimentarios, que alcanzan habitualmente valores entre 7,0 y 9,0 bares [3,8,14]. Además, los valores de K_{St} fueron inferiores a 45 bar·m·s^{-1}, por lo

que se pueden considerar materiales "marginalmente explosivos" si utilizamos el término empleado por Addo *et al*. [15]. Comparando los dos tipos de orujos, los resultados indican que la explosividad de Tempranillo fue bastante superior a la de Graciano, incluso cuando éste último tenía menos humedad y un tamaño de partícula más fina (muestra G2). La muestra G4 no produjo explosión en las condiciones del ensayo normalizado, por lo que se deduce que, para una determinada granulometría, cuando la humedad alcanza un determinado valor, el material no es capaz de inflamarse en la esfera de 20 litros.

Los valores determinados en este trabajo son coherentes con el estudio de Portarapillo *et al*. [4]. En dicho estudio obtuvieron valores más desfavorables para *TMIn*, *TMIc*, $P_{máx}$ y K_{St} debido a que utilizaron una muestra con granulometría más fina (d_{50} = 303 µm).

5. Conclusiones

En este estudio se han determinado los parámetros normalizados de sensibilidad a la ignición y de severidad de explosión de orujos de uvas tintas de las variedades Tempranillo y Graciano. Para estudiar el efecto del contenido de humedad, se generaron distintas muestras mediante secado en estufa con un tamaño aproximado aproximado de d_{50} = 500 µm.

Los resultados obtenidos indican que estos materiales, cuando se encuentran formando una capa de polvo sobre una superficie caliente, presentan una inflamabilidad similar a otras biomasas y materiales agrícolas y alimentarios. Sin embargo, cuando se encuentran dispersos en forma de nube, la temperatura mínima de ignición es bastante alta –superior a la de otras biomasas y materiales agroalimentarios– y varía claramente con la humedad. En ambos casos, capa y nube, los orujos de Graciano presentaron mayor facilidad de ignición que los orujos de Tempranillo. En cuanto a la ignición ante una chispa, estos materiales presentaron una inflamabilidad muy baja.

Por otro lado, los orujos son materiales capaces de producir una explosión de polvo y dar lugar a sobrepresiones, pero los valores alcanzados de P_{max} y K_{St} son muy bajos en comparación con otros materiales agroalimentarios.

No obstante, todos resultados de inflamabilidad y explosividad son dependientes del tamaño de partícula, por lo que muestras más finas podrían arrojar resultados más desfavorables.

Contribuciones de autoría: Conceptualización, A.T. y J.A-M.; metodología, A.T., B.C., J.M.P. y J.A-M.; investigación, B.C., I.C-G., A.V. y J.A-M.; curación de datos, A.T. y B.C.; recursos, B.C., J.M.P. y J.A-M.; redacción—borrador original, A.T.; redacción—revisión y edición, A.T., B.C.; administración del proyecto, A.T. y J.A-M.

Financiación: Esta investigación no ha recibido financiación externa.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Cebrián, M.; García-Roldán, A.; Ibarruri, J.; Zufía, J.; Jauregi, P. Biorefinery approach for an integrated valorisation of grape pomace in distilleries. *Biomass Conv. Bioref.* **2024**.
2. Weng, W.; Costa, M.; Aldén, M.; Li, Z. Single particle ignition and combustion of pulverized pine wood, wheat straw, rice husk and grape pomace. *Proc. Combust. Inst.* **2019**, *37*, 2663–2671.
3. Ramírez, Á.; García-Torrent, J.; Aguado, P.J. Determination of parameters used to prevent ignition of stored materials and to protect against explosions in food industries. *J. Hazard. Mater.* **2009**, *168*, 115–120.
4. Ramírez, Á.; García-Torrent, J.; Tascón, A. Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos. *J. Hazard. Mater.* **2010**, *175*, 920–927.
5. Wolf, J.P.; Dong. Biomass combustion for power generation: An introduction. In *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, 1st ed.; Rosendahl, L., Ed.; Woodhead Publishing, Sawston, England, 2013; pp. 3–8.
6. Eckhoff, R.K. Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *J. Loss Prev. Process Ind.* **2009**, *22*, 105–116.
7. Portarapillo, M.; Danzi, E.; Sanchirico, R.; Marmo, L.; Di Benedetto, A. Energy recovery from vinery waste: Dust explosion issues. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 11188.
8. Castells, B.; Varela, A.; Castillo-Ruiz, F.J.; Calvo, L.F.; Medic, L.; Tascón, A. Ignition and explosion characteristics of olive-derived biomasses. *Powder Technol.* **2023**, *420*, 118386.
9. EN ISO/IEC 80079-20-2, Explosive Atmospheres – Part 20-2: Material Characteristics – Combustible Dusts Test Methods; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016.
10. UNE-EN 14034-1:2005+A1:2011. Determinación de las características de explosión de nubes de polvo – Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión $p_{máx}$ de nubes de polvo. AENOR: Madrid, España, 2011.
11. UNE-EN 14034-2:2006+A1:2011. Determinación de las características de explosión de nubes de polvo – Parte 2: Determinación de la velocidad máxima de aumento de presión de explosión $(dp/dt)_{máx}$ de nubes de polvo. AENOR: Madrid, España, 2011.
12. UNE-EN 14491:2012. Sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo. AENOR: Madrid, España, 2012.
13. UNE-EN 14373:2022. Sistemas de supresión de explosiones. AENOR: Madrid, España, 2022.
14. Castells, B.; Tascón, A.; Amez, I.; Fernandez-Anez, N. Influence of particle size on the flammability and explosibility of biomass dusts: Is a new approach needed? *Fire Technol.* **2023**, *59*, 2989–3025.
15. Addo, A.; Portarapillo, M.; Di Benedetto, A.; Bu, Y.; Chunmiao, Y.; Dastidar, A.; Khan, F.; Amyotte, P. Investigation of marginally explosible dusts. *J. Loss Prev. Proc*

Using solar energy in large irrigation systems: insights from a benchmark study about irrigation networks in southern Spain

Maaike van de Loo [1]*, Emilio Camacho Poyato [1] and Juan Antonio Rodríguez Díaz [1]

[1] Department of Agronomy, University of Córdoba, Campus Rabanales, 14072 Córdoba, Spain

* Correspondence: maaikevandeloo@uco.es; Tel.: +34 957 21 24 44

Abstract: The transition to solar energy in large irrigation systems is rising in popularity as a response to increasing energy requirements and associated costs. Following an in-depth study on the Valle Inferior system, this research extends the analysis to six large-scale irrigation systems in southern Spain, examining the integration of solar energy and its interaction with agricultural management practices. Findings indicate that, despite substantial investments in solar plants – some exceeding several MWs – the share of total energy consumption covered by solar energy remains between 40% and 57%. This limitation is primarily due to 24-hour on-demand irrigation schedules, which require the use of conventional energy. While solar energy contributes to reducing reliance on fossil fuels, energy costs continue to rise, with increases ranging from 15% to 302%, mainly driven by external market fluctuations. Economic strategies, such as selling excess solar energy, offer a solution to counteract these rising costs. However, regulatory constraints often prevent irrigation systems from profiting from selling energy, and when permitted, declining solar prices pose additional challenges. To enhance the economic viability of solar energy in irrigation, the study highlights the need for alternative strategies, including energy storage solutions like batteries and pumped hydropower, alongside potential scheduling adjustments.

Keywords: Solar irrigation systems; On-demand irrigated agriculture; Solar energy indicators; Energy storage solutions for irrigation; Agricultural water management practices

1. Introduction

In recent years, the energy requirements of irrigation systems have significantly increased due to the transition from surface irrigation to pressurized systems like sprinkler and drip irrigation [1]. To address the rising energy costs, irrigation networks are increasingly adopting solar energy as an alternative energy source. The use of photovoltaic solar energy in large-scale irrigation systems is growing in popularity, but its implementation still presents several challenges. One key issue is matching solar energy production with irrigation demand, as many systems operate on-demand while solar energy is only generated during daylight hours [2,3]. Given the increase in solar energy use in large irrigation systems in southern Spain over

the past five years, this study examines its application in these systems. This article summarizes our previous study [4] on the integration of solar energy in irrigation systems in the south of Spain.

Irrigated agriculture plays a crucial role in global food production, accounting for 70% of freshwater withdrawals while contributing approximately 40% of global food output, despite covering only 24% of croplands [5]. Compared to rainfed agriculture, irrigation improves yield security, product quality, and enables summer cropping in arid regions [6]. However, the expansion of irrigation has intensified pressure on water resources. To improve water-use efficiency, many regions have transitioned from traditional surface irrigation to pressurized systems [7]. While these methods allow more precise water distribution, they also significantly increase energy consumption, leading to higher operational costs.

Spain is a country where irrigation energy demand has particularly risen in recent decades. Between 2002 and 2015, Spain modernized its irrigation networks to achieve water savings, replacing open-channel systems with pressurized networks. As a result, irrigation systems shifted from using large volumes of water with minimal energy to requiring less water but much more energy. Rising energy prices have further increased irrigation costs, making energy consumption a major factor in farm profitability.

The use of solar energy for powering irrigation systems is increasingly gaining popularity in the agricultural sector as a way to reduce energy costs and decrease greenhouse gas emissions. Initially, solar energy in agriculture was mainly used in small-scale irrigation systems, particularly in off-grid locations where no other energy sources were available [8]. Many studies have analysed such standalone solar-powered systems, showing their feasibility in remote areas [9,10]. In these locations, solar energy provides a cost-effective and sustainable solution to convert rainfed fields into irrigated ones.

More recently, solar energy has also been integrated into large irrigation schemes that require substantial energy inputs for their pressurized networks. Unlike small-scale systems, these large irrigation schemes do not rely solely on standalone solar energy but instead use a combination of solar and grid electricity. However, integrating solar energy into large irrigation networks introduces several challenges, particularly in matching energy production with irrigation demand. Conventional energy sources provide energy on demand, whereas renewable energy generation depends on resource availability. In large irrigation systems, where water is continuously available to farmers (including at night) this intermittency complicates the use of solar energy [2,3].

The challenge of aligning solar energy production with irrigation demand has been studied in the Valle Inferior irrigation system in southern Spain [2]. This system adopted solar energy in 2019 to reduce energy costs while maintaining operational efficiency. It installed a 6 MWp solar plant to serve its almost 19,000 ha network, operating in a hybrid system combining solar and conventional energy. Although the solar plant produced more energy annually than the total irrigation system consumption, only 54% of the system's energy needs was met by solar energy in 2021, and 57% in 2022. The primary reason for this was the system's continuous night-time operation.

Van de Loo et al. (2024) [2] examined two scenarios to optimize solar energy use in the Valle Inferior system. The first scenario focused on adjusting irrigation schedules from 24-hour operation to 8- or 12-hour schedules to align energy use with solar production. This adjustment could increase solar energy utilization to 98%, depending on water availability and irrigation schedule length. However, interviews with farmers revealed resistance to daytime irrigation due to concerns over evaporation losses and traditional preferences for lower night-time energy prices, despite the recent shift in Spain's energy pricing patterns [11].

The second scenario explored optimizing economic benefits by selling excess solar energy. Under this approach, maintaining a 24-hour irrigation schedule was more advantageous in years with higher water availability, as night-time energy costs remained lower. The optimal strategy depended on dynamic factors such as water availability, irrigation schedules, and fluctuating energy prices.

The study [2] demonstrated that while solar energy is a sustainable alternative to fossil fuels, its integration into large irrigation networks presents new management challenges. The choice between maximizing self-consumption of solar energy and optimizing economic returns from energy sales depends on multiple variables that vary yearly. Consequently, using solar energy in large irrigation networks adds a new layer of complexity to irrigation management, requiring both water and energy considerations to ensure efficient and economically viable operations.

The Valle Inferior system was one of the first large irrigation systems in Spain to implement solar energy, and several other systems in southern Spain have since followed. The experience of the Valle Inferior highlights opportunities for further optimization in solar energy use. Therefore, this study builds upon previous research by investigating whether similar challenges exist in other large systems. This is achieved through a benchmark study of six large irrigation networks in southern Spain. The aim is to assess the performance of systems that have integrated solar energy, evaluate how agricultural water management practices

influence solar energy efficiency, and provide insights for optimizing solar energy use in large irrigation systems.

2. Materials and Methods

2.1. Benchmark study

In this study, benchmarking is used to compare different irrigation systems. Benchmarking is a method to improve system performance by identifying best practices and applying them to systems that perform less efficiently [12]. It relies on performance indicators, which simplify complex system characteristics into measurable values. While benchmarking has already been used to analyze water and energy use in irrigation systems [13–15], no studies have yet compared the use of solar energy. Since solar energy is now increasingly used in large irrigation networks, this study evaluates its performance in several irrigation systems in southern Spain to better understand how solar energy can be used more efficiently.

2.2. Methodology

The six irrigation systems in this study are located in Andalusia and Extremadura, regions with significant agricultural activity, dry climates, and increasing use of solar energy. Since integrating solar energy into large irrigation systems is still relatively new, this study benchmarks these systems to assess their performance and explore how different water management practices impact solar energy use. The key practices analyzed include irrigation method, irrigation schedule, deficit irrigation practices, and crop type, as they directly affect water and energy efficiency. While the study focuses on southern Spain, its findings are relevant for large irrigation systems worldwide facing similar challenges in solar energy integration.

While selecting the irrigation systems, performance indicators were defined to facilitate a comparison between the different systems. These indicators assess the performance of irrigation systems in terms of water use, energy consumption, and financial costs. They are divided into three categories:

- Water use indicators: These measure how efficiently water is used in the irrigation process. The indicators include the assigned water allocation [m^3 ha^{-1}], the annual irrigation water supply [m^3], the irrigation supply per hectare [m^3 ha^{-1}], the effective rainfall [m^3], the annual irrigation water requirements [m^3] and the relative irrigation supply (RIS) [–].
- Energy indicators: These assess both general energy consumption and the integration of solar energy. The indicators include the total energy consumption [kWh], the total energy consumption per hectare [kWh ha^{-1}], the energy consumption per cubic meter of water supplied to the field [kWh m^{-3}], the total installed power [kW], the installed power per hectare [kW ha^{-1}], the installed power per cubic meter of water supplied to the field [kW m^{-3}], the

solar energy production [kWh], the consumed solar energy [kWh], the sold solar energy [kWh], the ratio of solar energy to total energy consumption [–], the power of the solar plant [kW] and the ratio of the power of the solar plant to the installed power [–].

- Financial indicators: These provide insight into the economic implications of using solar energy. The indicators include the total MOM (management, operation and maintenance) costs [€], the MOM costs per cubic meter of water [€ m^{-3}], the total energy costs [€], the total energy costs per cubic meter of water [€ m^{-3}], the profits of selling excess solar energy [€], the energy costs minus the profits of selling solar energy [€], the ratio of the energy costs to the total MOM costs [–] and the saved energy costs [€].

After selecting the systems and defining the indicators, field visits were conducted, including interviews with technical staff and visits to the solar plants. This provided insights into system characteristics such as size, irrigation methods, crop types, and solar plant capacity (see 2.3. Study area). The technical staffs furthermore provided detailed datasets on water use, energy consumption, solar energy production, and operational costs. These data, covering 2021 and 2022, were required for calculating performance indicators and analysing system operations during the first full years of solar plant use. Once the data were gathered, performance indicators for each irrigation system were calculated, and the results were analyzed to assess system performance, focusing on water use, (solar) energy consumption, and costs

2.3. Study area

The six irrigation systems studied are Valle Inferior, Santa María Magdalena, Bembézar, Guadalcacín, Genil Cabra and Zújar. These systems are located in the Guadalquivir, Guadalete-Barbate and Guadiana River Basins, regions characterized by a semi-arid climate with low and irregular rainfall. Water availability is strictly regulated, with seasonal allocations often falling below the maximum of 6,000 m^3 ha^{-1} due to recurring droughts.

Most systems operate similarly: river water is transported to a main canal, from where it is stored in reservoirs until the water is used for irrigation. From these reservoirs, pressure pumps are used to transport water to hydrants, from which water is being applied to the fields. The Santa María Magdalena system differs slightly, as water is transported directly from the river to its reservoir. All systems use on-demand irrigation, with surface, sprinkler, and drip methods varying between them (see Table 1 for system characteristics).

All six systems have integrated photovoltaic solar energy in the last six years (since 2019), with solar plant capacities ranging from 400 to 6,000 kWp. Some systems, such as Valle Inferior, Bembézar and Genil Cabra, use tracking panels for higher efficiency, while the other systems have fixed panels.

Selling excess solar energy is not permitted in all systems. If a solar plant was (partly) funded by government subsidies, profits from selling energy are restricted for five years. Currently, only Valle Inferior and Bembézar sell excess energy, though Bembézar only started in 2023 (after the study period). Santa María Magdalena is allowed to sell energy since its plant was fully financed by the farmers of the system, but administrative issues with the energy company have prevented them from receiving compensation.

Table 1. General information of the selected irrigation systems, provided by the technical staff of the systems.

Irrigation system	River basin	Total area		Irrigated area		Irrigation method	Dominant crop types		Using solar energy since
[-]	[-]	[ha]		[ha]		[%]	[-]		[-]
		2021	2022	2021	2022		2021	2022	
Valle Inferior	Guadalquivir	18,945	18,945	18,401	18,036	38% surface 62% drip	40% citrus; 11% cotton; 8% potato; 6% fruit trees; 6% wheat; 3% olives; 3% sunflower; 3% maize; 2% almonds	42% citrus; 10% cotton; 8% potatoes; 7% wheat; 6% fruit trees; 5% sunflower; 3% olives; 3% almonds; 2% tomato	2019
Santa María Magdalena	Guadalquivir	6,000	6,000	5,856	5,949	10% sprinkler 90% drip	66% olives; 27% cotton; 2% wheat; 2% almonds	76% olives; 18% cotton; 2% almonds	2021
Bembézar	Guadalquivir	12,788	12,788	12,354	11,912	5% sprinkler 95% drip	62% citrus; 8% olives; 7% wheat; 6% cotton; 3% almonds; 3% maize; 2% sunflower	62% citrus; 8% sunflower; 7% olives; 7% wheat; 5% cotton; 4% almonds	2020
Guadalcacín	Guadalete-Barbate	12,630	12,630	11,842	11,772	60% sprinkler 40% drip	29% cotton; 19% maize; 14% sunflower; 9% horticulture; 8% alfalfa; 6% olives; 2% tomato	25% cotton; 17% maize; 12% horticulture; 11% sunflower; 8% alfalfa; 7% olives; 4% tomato	2020
Genil Cabra	Guadalquivir	24,571	24,301	24,529	24,245	15% sprinkler 85% drip	50% olives; 10% wheat; 7% almonds; 6% cotton; 3% garlic; 3% sunflower	51% olives; 11% wheat; 7% almonds; 5% sunflower; 5% cotton; 2% garlic	2022
Zújar	Guadiana	21,568	21,568	19,808	19,221	6% surface 19% sprinkler 75% drip	21% maize; 20% tomato; 15% olives; 10% horticulture; 5% fruit trees; 4% wheat; 3% fig trees	21% tomato; 16% olives; 12% maize; 9% horticulture; 6% wheat; 6% sunflower; 5% fruit trees; 3% fig trees	2019

3. Results

3.1. Water use indicators

Table 2 presents the water use indicators for the six irrigation systems, highlighting both similarities and differences between them, as well as variations between 2021 and 2022.

In all systems except Guadalcacín, assigned water allocations were lower in 2022 than in 2021, leading to a reduced irrigation water supply. Due to ongoing drought

conditions, allocations have increasingly fallen below the theoretical maximum of 6,000 m^3 ha^{-1}. In 2021, assigned volumes were 33–58% lower than in a 'normal' year, and in 2022, reductions ranged from 33% to 75%. These variations largely depend on the systems' location within their respective river basins, with the Guadalquivir Basin (Valle Inferior, Santa María Magdalena, Bembézar and Genil Cabra) experiencing stricter reductions than the Guadalete-Barbate and Guadiana Basins (Guadalcacín and Zújar). Additionally, within the Guadalquivir Basin, water rights influence allocations. Bembézar, for example, receives a higher volume than neighbouring systems.

Santa María Magdalena and Genil Cabra stand out for their particularly low irrigation water supplies and correspondingly low RIS values. Despite relatively stable theoretical water requirements, RIS values declined in 2021 and 2022, dropping to 0.22 and 0.16 in Santa María Magdalena and 0.29 and 0.20 in Genil Cabra. This is primarily due to the high proportion of olive cultivation: 66% and 76% in Santa María Magdalena, and around 50% in Genil Cabra (Table 1). In southern Spain, olives are typically grown under deficit irrigation, a strategy that maximizes yield per unit of water while reducing overall consumption. Studies suggest an optimal irrigation supply for olives of approximately 1,366 m^3 ha^{-1} (RIS = 0.29), aligning with observed values and demonstrating how farmers adapt to water scarcity through efficient water use.

Table 2. Results of the water use indicators for the studied irrigation systems in the years 2021 and 2022.

	Assigned water allocation		Annual irrigation water supply		Irrigation water supply per hectare		Effective rainfall		Irrigation water requirements		Relative irrigation supply	
	[m^3 ha^{-1}]		[m^3]		[m^3 ha^{-1}]		[m^3]		[m^3]		[-]	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Valle Inferior	3,000	1,500	59,517,032	43,398,737	3,142	2,291	74,264,400	61,988,040	142,112,390	150,819,791	0.42	0.29
S.M. Magd.	3,000	1,500	9,042,368	6,966,904	1,507	1,161	17,958,000	16,812,000	40,505,952	44,528,265	0.22	0.16
Bembézar	4,000	2,000	46,327,000	25,104,640	3,623	1,963	52,788,864	49,553,500	92,890,898	94,757,653	0.50	0.26
Guadalcacín	6,000	6,000	59,352,489	60,082,568	4,699	4,757	44,937,540	61,078,680	78,500,618	83,133,864	0.76	0.72
Genil Cabra	2,500	1,500	54,993,230	36,650,121	2,238	1,508	80,371,741	83,911,353	189,216,910	187,101,560	0.29	0.20
Zújar	4,000	4,000	82,946,934	68,709,320	3,846	3,186	68,284,288	74,970,368	128,791,616	130,087,728	0.64	0.53

3.2. Energy indicators

3.2.1. General energy indicators

The general energy indicators are shown in Table 3. Due to lower water allocations and irrigation water supplies in 2022 compared to 2021, energy consumption also decreased in all systems except Guadalcacín, where allocations remained stable. Reductions varied, with Zújar decreasing by 17%, Santa María Magdalena by 28%, Valle Inferior by 32%, Genil Cabra by 44%, and Bembézar by 50%.

Despite its relatively low irrigation water supply, as explained above, the Santa María Magdalena system has a high energy consumption per hectare (Table 3). This is due to significant elevation differences of up to 140 m, which require more energy for pumping. A similar pattern is observed in the Guadalcacín system, where both elevation differences and a higher irrigation water supply (Table 2) contribute to increased energy use.

3.2.2. Solar energy indicators

Table 4 presents the solar energy indicators. It is important to note that the Santa María Magdalena system only started generating solar energy in July 2021 and Genil Cabra in May 2022. As a result, their initial solar energy production – relative to plant capacity – was significantly lower than in the other systems.

Figure 1 illustrates key solar energy results, distinguishing between consumed and sold solar energy. Among the studied systems, only Valle Inferior and Santa María Magdalena sold excess energy to the national grid. However, as previously mentioned, Santa María Magdalena does not receive financial compensation for this.

The other systems were not permitted to sell excess solar energy immediately after construction due to subsidy restrictions. Consequently, these systems only track the solar energy directly used for irrigation, without monitoring surplus production. This becomes evident when comparing the Valle Inferior and Bembézar irrigation systems, both with similar solar plant capacities (6,000 and 5,250 kWp, respectively). Despite this, Valle Inferior produced 10.9 million kWh of solar energy in 2022, while Bembézar reported just 1.9 million kWh. The discrepancy suggests that

Table 3. Results of the general energy indicators for the studied irrigation systems in the years 2021 and 2022.

	Energy consumption [kWh]		Energy consumption per hectare [kWh ha^{-1}]		Energy consumption per cubic meter of water [kWh m^{-3}]		Installed power [kW]		Installed power per hectare [kW ha^{-1}]		Installed power per cubic meter of water [kW m^{-3}]	
	2021	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**
Valle Inferior	9,071,914	6,174,807	479	326	0.15	0.14	12,360	12,360	0.65	0.65	$2.08 \cdot 10^{-4}$	$2.85 \cdot 10^{-4}$
S.M. Magdalena	6,791,101	4,877,502	1,132	813	0.75	0.70	5,800	5,800	0.97	0.97	$6.41 \cdot 10^{-4}$	$8.33 \cdot 10^{-4}$
Bembézar	9,331,600	4,704,690	730	368	0.20	0.19	10,880	10,880	0.85	0.85	$2.35 \cdot 10^{-4}$	$4.33 \cdot 10^{-4}$
Guadalcacín	14,015,786	14,135,829	1,110	1,119	0.24	0.24	14,888	14,888	1.18	1.18	$2.51 \cdot 10^{-4}$	$2.48 \cdot 10^{-4}$
Genil Cabra	18,041,850	10,101,254	734	416	0.33	0.28	32,154	32,154	1.31	1.32	$5.85 \cdot 10^{-4}$	$8.77 \cdot 10^{-4}$
Zújar	20,015,710	16,659,664	928	772	0.24	0.24	21,400	21,400	0.99	0.99	$2.58 \cdot 10^{-4}$	$3.11 \cdot 10^{-4}$

Table 4. Results of the solar energy indicators for the studied irrigation systems in the years 2021 and 2022.

	Solar energy production [kWh]		Consumed solar energy [kWh]		Sold solar energy [kWh]		Consumed conventional energy [kWh]		Ratio solar energy to total energy consumption [-]		Power solar plant [kW]		Ratio power solar plant to installed power [-]	
	2021	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**
V. Inferior	11,483,784	10,866,781	4,870,496	3,510,932	6,613,288	7,355,849	4,201,418	2,663,875	0.54	0.57	6,000	6,000	0.49	0.49
S.M. Magdalena	1,409,217	6,728,488	834,781	2,510,949	574,436	4,217,539	5,956,320	2,366,553	0.12	0.51	3,500	3,500	0.60	0.60
Bembézar	3,697,834	1,880,580	3,697,834	1,880,580	0	0	5,633,766	2,824,110	0.40	0.40	5,250	5,250	0.48	0.52
Guadalcacín	691,679	653,139	691,679	653,139	0	0	13,324,107	13,482,690	0.05	0.05	400	400	0.03	0.03
Genil Cabra	0	2,507,122	0	2,507,122	0	0	18,041,850	7,594,132	0.00	0.25	4,000	4,000	0.12	0.12
Zújar	469,804	566,523	469,804	566,523	0	0	19,545,906	16,093,141	0.02	0.03	1,220	1,220	0.06	0.06

Table 5. Results of the financial indicators for the studied irrigation systems in the years 2021 and 2022.

	Total MOM costs [€]		MOM costs per cubic meter of water [€ m^{-3}]		Total energy costs [€]		Profits selling solar energy [€]		Energy costs minus profits [€]		Energy costs per cubic meter of water [€ m^{-3}]		Ratio energy costs to MOM costs [-]		Saved energy costs [€]	
	2021	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**	**2021**	**2022**
V**alle** Inferior	4,337,668	4,449,267	0.07	0.10	583,904	1,034,793	771,843	1,345,385	-187,939	-310,592	0.012	0.012	0.13	0.23	676,891	1,363,836
S.M. Magdalena	1,981,447	1,908,354	0.22	0.27	942,067	1,083,474	0	0	942,067	1,083,474	0.05	0.15	0.48	0.57	132,031	1,149,583
Bembézar	4,330,073	3,860,500	0.09	0.15	507,484	1,154,943	0	0	507,484	1,154,943	0.01	0.05	0.12	0.30	333,097	769,079
Guadalcacín	4,839,712	8,412,099	0.08	0.14	1,144,996	4,598,248	0	0	1,144,996	4,598,248	0.02	0.08	0.24	0.55	59,439	222,752
Genil Cabra	4,953,747	5,467,033	0.09	0.15	1,828,724	3,811,068	0	0	1,828,724	3,811,068	0.03	0.10	0.37	0.70	0	1,258,184
Zújar	5,498,052	5,165,795	0.07	0.08	2,061,406	1,638,780	0	0	2,061,406	1,638,780	0.02	0.02	0.37	0.32	49,548	57,690

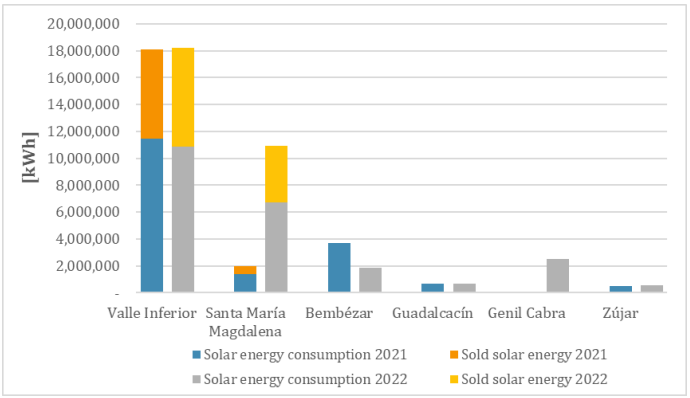


Figure 1. Solar energy production, divided into consumed solar energy and sold solar energy, for the studied irrigation systems in 2021 and 2022

Bembézar's actual production could be much higher, but unutilized energy goes unrecorded.

Table 4 and Figure 1 also show that Zújar's solar energy production is lower than Guadalcacín's, despite its larger plant capacity. This is due to higher water availability in Guadalcacín, leading to increased irrigation and energy consumption. Since both systems only register solar energy used within the system, those with lower water allocations naturally report lower solar energy production.

Regarding the share of solar energy in total energy consumption, Valle Inferior, Santa María Magdalena and Bembézar achieve ratios of 0.40 – 0.57, meaning that nearly half of their energy demand is met by self-produced solar power. In the Valle Inferior and Santa María Magdalena systems, where surplus solar energy is tracked, total solar production even exceeds consumption. In theory, this suggests they could fully rely on solar energy. However, van de Loo et al. (2024) [2] found that in large, on-demand irrigation systems, energy consumptions remain relatively stable throughout the day and night. Since solar energy is only generated during daylight hours, a secondary energy source remains essential, preventing complete reliance on solar energy.

The Genil Cabra system is expected to reach similar solar energy ratios in the future. However, since it only started using solar power in May 2022, solar energy covered just 25% of total consumption that year. In contrast, Guadalcacín and Zújar have significantly smaller solar plants, supplying only a limited share of their total energy needs. However, during the conducted interviews, technical staff indicated plans to expand solar capacity in both systems to increase reliance on renewable energy.

3.3. Financial indicators

Table 5 presents the financial indicators for the six irrigation systems. MOM costs remained relatively stable across all systems in 2021 and 2022, except in

Guadalcacín, where they nearly doubled due to a sharp rise in energy costs. Despite a general decrease in energy consumption, Table 5 shows that total energy costs increased in all systems except Zújar, illustrating the impact of rising energy prices.

The Zújar system was the only one that experienced a reduction in energy costs (21% lower in 2022 compared to 2021), mainly due to more favourable energy contract conditions. However, energy costs in Valle Inferior, Bembézar and Genil Cabra nearly doubled (increases of 77%, 128%, and 108%, respectively), while the Guadalcacín system saw an extreme rise of 302%. Santa María Magdalena had a more modest increase of 15%. The significant rise in energy costs in 2022 was largely due to Russia's invasion of Ukraine, which triggered a surge in global energy prices. Additionally, energy prices were already elevated at the end of 2021 due to the COVID-19 pandemic [16,17].

These increasing costs highlight the importance of maximizing the use of solar energy to reduce dependence on conventional power sources. Efficient use of self-produced solar energy not only mitigates energy expenses but also presents an economic opportunity when excess energy is sold back to the national grid. However, during the study period, only the Valle Inferior system received financial compensation for excess solar energy. While the Santa María Magdalena system also feeds excess energy into the grid, it has yet to receive profits due to administrative issues with the energy company.

In Valle Inferior, profits from selling solar energy exceeded total energy costs, resulting in a net financial gain. Interviews with technical staff revealed that these profits are currently being used to pay off the construction costs of the solar plant while maintaining stable energy prices for farmers. Once the plant is fully paid off, setting energy prices at zero was mentioned as a potential future scenario.

Table 5 also presents estimated energy cost savings, reflecting the financial benefits of using self-produced solar energy instead of purchasing conventional energy. These numbers are approximations based on average energy prices, as daily and monthly tariff variations were not factored in. Nonetheless, they provide a useful indication of potential cost reductions and can help similar irrigation systems estimate the payback period for solar energy investments.

3.4. Discussion key results

This benchmark study highlights critical insights into water and energy use, as well as solar energy integration, in large irrigation systems in southern Spain. Most systems experienced reduced water allocations from the water authorities due to Spain's ongoing hydrological challenges. This directly led to lower energy

consumption across irrigation systems. However, despite reduced energy use and the integration of solar energy, energy costs have significantly increased. To mitigate these high costs, the Valle Inferior system sells excess solar energy to the national energy grid, generating profits that offset expenses. However, systems that received subsidies for solar plant construction are temporarily restricted from selling surplus energy, limiting their ability to counter rising costs effectively.

These restrictions also influence how solar energy production is monitored. Systems that cannot sell or transport excess energy only track the portion used directly for irrigation, leading to discrepancies in reported solar production. For instance, while Valle Inferior and Bembézar have similar solar plant capacities, recorded solar production in Bembézar is significantly lower due to these limitations.

In terms of agricultural water management, all systems rely on large-scale pressurized irrigation networks, which demand high energy inputs. This shift toward energy-intensive pressurized irrigation stems from Spain's modernization efforts, replacing traditional gravity-fed systems. While olives are the dominant crop across these systems, deficit irrigation is commonly used to optimize water use without major yield reductions.

Nevertheless, agricultural practices such as deficit irrigation, irrigation method and crop type do not seem to significantly impact solar energy utilization. For example, the Santa María Magdalena system, despite its low irrigation water supply and RIS value, reached a solar energy-to-total energy consumption ratio of 0.51 in 2022. This is comparable to the Valle Inferior system, which supplies nearly twice as much water per hectare but exhibits similar solar energy usage patterns.

A recurring challenge across all systems is the reliance on on-demand irrigation, operating 24 hours a day. By allowing farmers to access water and energy at any time, including at night, these systems require a secondary energy source when solar energy is unavailable. As a result, even in systems where solar production exceeds total energy consumption, conventional energy sources remain essential for nighttime irrigation.

4. Discussion

The integration of solar energy in large irrigation systems is increasing, but its full potential remains unutilized. One key issue is that irrigation systems operate 24/7 to provide farmers with water whenever needed. While some systems generate more solar energy than their total consumption, only about half of their energy use comes from solar, mainly due to this on-demand irrigation. As a result, a secondary energy source is always required. Shifting irrigation to daylight hours could increase

solar energy use, but this conflicts with farmers' preference for nighttime irrigation to minimize evaporation, particularly during years with a low water allocation. Time-of-use pricing, charging lower rates during the day and higher rates at night, could incentivize change, but these are currently not very common in irrigation systems.

Selling excess solar energy could help offset rising energy costs, but regulatory restrictions often prevent this. In Spain, irrigation systems that receive subsidies cannot sell solar energy for five years, limiting their financial benefits. Additionally, fluctuations in energy prices have made selling excess energy less profitable in recent years. Some systems have even been forced to limit solar production to avoid costs associated with negative energy prices. These issues raise concerns about the long-term profitability of large solar plants and highlights the need for storage solutions or collaborations with the energy sector.

It is reasonable that irrigation systems receiving subsidies are not allowed to receive all profits from selling excess solar energy. However, it could benefit multiple parties to allow systems to sell this energy, even at a reduced price for the first five years. This would provide economic benefits to the irrigation systems, especially during dry years, and help the energy grid increase its renewable energy share. Currently, much of the solar energy produced is not used for irrigation or sent to the grid. Allowing direct sales of excess energy would boost renewable energy use, supporting the European Green Deal's goal of reducing fossil fuel reliance by increasing renewable energy sources to 40% by 2030 and achieving climate neutrality by 2050 [18].

Storage solutions like batteries or pumped hydro could help irrigation systems maximize their use of solar energy. Batteries would allow energy use at night, reducing reliance on conventional sources, but high investment costs and long payback periods make them a risky choice. Pumped hydro storage, which uses excess solar energy to pump water uphill for later energy generation, offers a well-established and efficient alternative [19]. However, its feasibility depends on geographic conditions, making it impractical for irrigation systems in flat regions.

Ultimately, optimizing solar energy use in irrigation requires a combination of strategic adjustments: modifying irrigation schedules, implementing storage solutions and refining solar plant designs. Floating solar panels, for example, could enhance efficiency while reducing water evaporation. Additionally, ensuring financial viability through regulatory adjustments and market incentives is crucial for the sustainable integration of solar energy in irrigation systems. These changes can enhance energy efficiency, reduce costs and support sustainability goals,

ensuring that solar energy becomes a more reliable and profitable resource for large irrigation systems.

5. Conclusions

This study explored the integration of solar energy in six large irrigation systems in southern Spain, highlighting its potential and challenges. While solar energy offers benefits like reduced energy costs and emissions, its integration in irrigation systems is limited by the 24-hour operation and preference for nighttime irrigation, requiring conventional energy during non-solar hours. Innovative scheduling and energy storage solutions are crucial to optimize solar energy use. Other agricultural practices, such as irrigation methods, deficit irrigation practices and crop types, have minimal impact on solar energy integration. The study also revealed disparities in systems' ability to sell surplus solar energy, influenced by subsidy regulations. Allowing systems to sell excess energy could improve financial viability. Furthermore, energy storage solutions like batteries and pumped hydropower are promising but underexplored, offering energy independence and reliability. Technological advancements, including floating solar panels, could further optimize energy efficiency while benefiting water conservation and quality. Collaboration between irrigation systems and energy networks is essential for optimizing energy use and fostering innovation. In conclusion, optimizing solar energy integration in large irrigation systems will require addressing technical, economic and policy challenges to ensure sustainability and support climate goals.

Author Contributions: Conceptualization, M. van de Loo, E. Camacho Poyato and J.A. Rodríguez Díaz; methodology, M. van de Loo, E. Camacho Poyato and J.A. Rodríguez Díaz.; validation, M. van de Loo; formal analysis, M. van de Loo; investigation, M. van de Loo; resources, M. van de Loo; data curation, M. van de Loo; writing—original draft preparation, M. van de Loo; writing—review and editing, M. van de Loo, E. Camacho Poyato and J.A. Rodríguez Díaz; visualization, M. van de Loo; supervision, E. Camacho Poyato and J.A. Rodríguez Díaz; project administration, E. Camacho Poyato and J.A. Rodríguez Díaz; funding acquisition, E. Camacho Poyato and J.A. Rodríguez Díaz. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research is part of the HOPE project (Ref. PID2020- 115998RBC21) funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation, and part of the HY4RES project (Ref. EAPA_0001/2022) co-funded by the EU programme Interreg Atlantic Area.

Data Availability Statement: Data will be made available on request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Berbel J, Expósito A, Gutiérrez-Martín C, Mateos L. Effects of the Irrigation Modernization in Spain 2002–2015. *Water Resources Management*. 2019;33(5):1835-1849. doi:10.1007/s11269-019-02215-w
2. van de Loo M, Camacho Poyato E, van Halsema G, Rodríguez Díaz JA. Defining the optimization strategy for solar energy use in large water distribution networks: A case study from the Valle

Inferior irrigation system, Spain. *Renew Energy*. 2024;228(120610). doi:10.1016/j.renene.2024.120610
3. Narvarte L, Fernández-Ramos J, Martínez-Moreno F, Carrasco LM, Almeida RH, Carrêlo IB. Solutions for adapting photovoltaics to large power irrigation systems for agriculture. 2018;29:119-130. doi:10.1016/j.seta.2018.07.004
4. van de Loo M, Camacho Poyato E, Rodríguez Díaz JA. Using solar energy for irrigation in large water distribution networks: A benchmark study about six irrigation systems in the south of Spain. *Energy Nexus*. 2025;17:100386. doi:10.1016/J.NEXUS.2025.100386
5. Mehta P, Siebert S, Kummu M, et al. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. *Nature Water*. 2024;2(3):254-261. doi:10.1038/s44221-024-00206-9
6. Rodríguez Díaz JA, Camacho Poyato E, Blanco Pérez M. Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2011;137(10):644-650. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000338
7. Playán E, Mateos L. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric Water Manag*. 2006;80(1-3):100-116. doi:10.1016/J.AGWAT.2005.07.007
8. Mérida García A, Fernández García I, Camacho Poyato E, Montesinos Barrios P, Rodríguez Díaz JA. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J Clean Prod*. 2018;175:670-682. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.093
9. López-Luque R, Reca J, Martínez J. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. *Appl Energy*. 2015;149:13-23. doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.107
10. Aliyu M, Hassan G, Said SA, Siddiqui MU, Alawami AT, Elamin IM. A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;87:61-76. doi:10.1016/j.rser.2018.02.010
11. Bonilla-Campos I, Sorbet FJ, Astrain D. Radical change in the Spanish grid: Renewable energy generation profile and electric energy excess. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022;32. doi:10.1016/J.SEGAN.2022.100941
12. Malano H, Burton M. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. *International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage, FAO*. Published online 2001.
13. Molden DJ, Sakthivadivel R, Perry CJ, de Fraiture C, Kloezen WH. *Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems*. Research Report 20. International Water Management Institute; 1998. Accessed July 12, 2024. https://books.google.com/books/about/Indicators_for_Comparing_Performance_of.html?hl=nl&id=y2PRIcLsyg0C
14. Alexander PJ, Potter MO. Benchmarking of Australian irrigation water provider businesses. *Irrigation and Drainage*. 2004;53(2):165-173. doi:10.1002/IRD.131
15. Institute for Diversification and Energy Savings. Protocolo de Auditoria Energética En Comunidades de Regantes.; 2008.
16. Benton TG, Froggatt A, Wellesley L, et al. The Ukraine War and Threats to Food and Energy Security: Cascading Risks from Rising Prices and Supply Disruptions.; 2022.
17. Kuik F, Adolfsen JF, Meyler A, Lis E. Energy price developments in and out of the COVID-19 pandemic – from commodity prices to consumer prices. *Economic Bulletin*. 2022;4. Accessed September 11, 2024. https://ideas.repec.org/a/ecb/ecbart/202200041.html
18. European Commission, Directorate-General for Communication. European green deal: delivering on our targets. Published online 2021.
19. Shafiullah M, Ahmed SD, Al-Sulaiman FA. Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems: A Review. *IEEE Access*. 2022;10:52233-52257. doi:10.1109/ACCESS.2022.3174555

Análisis, diseño y cálculo de la instalación de un alumbrado inteligente en sistemas agrovoltaicos en un cultivo de patata

Antonio Rodríguez Nicolás[1], Francisco J. Cánovas Rodríguez[2], Dolores Parras-Burgos[3] y José Miguel Molina-Martínez[1].

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia. antonio.rodriguez@edu.upct.es, josem.molina@upct.es

[2] Dpto de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. fcojavier.canovas@upct.es

[3] Dpto de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. dolores.parras@upct.es

Resumen: La creciente necesidad de optimizar los recursos energéticos en el sureste de España ha impulsado el desarrollo de sistemas "agrovoltaicos", que integran la producción agrícola con la generación de energía eléctrica. Nuestro innovador modelo presenta una estructura elevada de 4,2 metros, que permite instalar paneles fotovoltaicos móviles sobre los cultivos sin interferir en las labores agrícolas. Estos paneles se ajustan regulando la cantidad de luz natural recibida, complementándose con un sistema de iluminación LED cuando sea necesario. Las luminarias, en forma de campana, han sido seleccionadas para proporcionar la intensidad lumínica óptima para los cultivos de la patata en cada etapa de su desarrollo, adaptándose a las demandas de luz de cada fase fenológica. Se utiliza el software DIALux Evo para la planificación y cálculo de la distribución lumínica, finalmente se ha dimensionado el sistema con lámparas de 50W y 6000 lúmenes. Estas luminarias pueden encenderse y apagarse de manera alternada, sincronizadas con el ajuste de las placas solares, para asegurar que se cubran las necesidades lumínicas máxima de la patata que están en torno a 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. De este modo, se garantiza que los cultivos reciban siempre la cantidad adecuada de luz, complementándose esta luz aportada con la ya proporcionada de manera natural por el sol

Palabras clave: fotovoltaica, iluminación led, control de iluminación, placas móviles, patatas.

1. Introducción

La creciente demanda de energía y agua en los cultivos hortícolas del sur de Europa, especialmente en España, ha impulsado la integración de la energía fotovoltaica en la agricultura. Esta solución permite aprovechar el alto número de horas de sol en la región para optimizar la producción agrícola y la generación de energía [1]. Sin embargo, su implementación en entornos abiertos plantea desafíos técnicos y estratégicos que requieren un estudio detallado.

En este trabajo se presenta el diseño y cálculo de un sistema de alumbrado adaptado a una estructura agrovoltaica de 4,2 metros de altura, que permite el paso de maquinaria agrícola sin interferencias. La instalación consta de una cubierta a dos aguas con 36 módulos fotovoltaicos en cada lado, de los cuales la mitad son móviles. Estos módulos pueden desplazarse en grupos de tres, regulando la cantidad de luz natural que recibe el cultivo según sus necesidades fenológicas. En la Figura 1, se muestra la estructura abierta totalmente en una de sus aguas (1.a) y representación inferior de la estructura (1.b).

El objetivo principal es la de diseñar una instalación de alumbrado artificial basado en iluminación LED que, en función del aporte de luz natural existente, y de las necesidades que pueda requerir nuestro cultivo, posibilite que el aporte de esta instalación de alumbrado en nuestro cultivo, sea tal, que suplemente al existente por la luz natural, de forma que nuestro cultivo reciba el aporte "ideal" de luz, atendiendo a los parámetros de cantidad de luz y espectro de luz que se emita sobre nuestro cultivo [2,3]. Para la consecución de este objetivo principal, se debe tener en cuenta de que se parte de un sistema cuyo fin primordial es gestionar el movimiento de los paneles para maximizar tanto la producción de energía como la calidad del cultivo. En dicho sistema se prevé tres niveles de apertura de los módulos, lo que genera variaciones en la luz disponible en determinadas zonas del cultivo. Es fundamental considerar, que está variación no viene dado sólo por la apertura artificial que se está generando en el techo de nuestra estructura, sino también por la inclinación o incidencia de los rayos solares sobre nuestra estructura, muy dependiente del momento del año, así como de la hora en cada día. Todo esto sin tener en cuenta, que situaciones puntuales como por ejemplo podría ser días nublados

(a) (b)

Figura 1. a) Disposición totalmente abierta de los módulos, en una cara, y b) vista inferior de dicha configuración.

En el presente caso a estudio se pretende garantizar un crecimiento óptimo del cultivo con un sistema de iluminación con luminarias LED estratégicamente distribuidas con marcado carácter comercial y económico, estás consideración han dificultado la consecución de los niveles de iluminación y de espectros ideales para nuestro cultivo, pero por el contrario, se ha conseguido una instalación de alumbrado que favorecerá un crecimiento óptimo de nuestro cultivo, con un menor costo por luminaria, y una energía generada por nuestras placas susceptible de ser utilizado para otros fines, e incluso su venta a la red. Todo esto su justifica por el hecho de que las lámparas específicas para uso en invernaderos y estructuras cerradas se caracterizan por un precio y consumo muy alto.

En nuestro caso dichas luminarias serán controladas mediante microcontroladores que ajustarán las luminarias que deben estar conectadas en función de la fase fenológica de la planta y del aporte de luz natural existente.

En esta comunicación se presenta el sistema de iluminación diseñada, junto con el análisis de consumos energéticos, eficiencia lumínica y espectros de las luminarias para optimizar el rendimiento de las plantas a lo largo del día y en cada fase fenológica [4], con el menor consumo energético.

Es decir, asegurando la viabilidad económica de la instalación, haciendo que la propuesta sea rentable y sostenible a largo plazo en el sector hortícola en general, y en particular, en el cultivo de la patata. Ya que, como parte la iluminación artificial de una solución integral se busca que no sólo se cubran las necesidades de autoconsumo energético –desviando el porcentaje más bajo posible al alumbrado-, sin que se buscará la existencia de un excedente de electricidad que podrá ser comercializado, unificando la producción agrícola y energética en este innovador modelo “agrovoltaico”.

2. Materiales and Métodos

2.1. Punto de partida.

En primer lugar, se definirá o diseñará una estructura, donde se instale nuestra instalación fotovoltaica “movible”, y la iluminación, y por supuesto, el cultivo de referencia aspecto fundamental para definir la intensidad lumínica y espectro necesario en cada momento. La parcela de referencia es de 13,5 × 12,8 m, cultivada con patatas, sobre la que se levanta nuestro sistema fotovoltaico, teniendo este una altura, desde la superficie del suelo, de 4,5 m. La zona de estudio de nuestra parcela de referencia será la formada por la superficie central de dicha estructura, con esta consideración lo que se consigue es minimizar los efectos bordes –frontera-, es decir, minimizar los efectos medio ambientales especialmente existentes en la zona

cercana a los laterales de nuestra estructura, consiguiendo con esto que los resultados del estudio sean extrapolables a la de una estructura agrovoltaica de mucha mayor superficie.

2.2. Software utilizado.

Entre los parámetros fundamentales necesarios para validar nuestra instalación de alumbrado, está el nivel de iluminación y la distribución de dicha iluminación sobre la superficie de referencia, para conseguir estos valores, en el mercado actualmente hay dos softwares susceptibles de utilizarse, el DialuxEVO y Relux. Tomando como referencia que la mayoría de los fabricantes de lámparas y luminarias tienen definidos los pluggins de sus luminarias para el DialuxEVO especialmente, se elige el mismo, para el modelado y simulación de nuestra instalación de alumbrado.

Este software nos permite la representación de la estructura tridimensional diseñada previamente, para así estudiar y simular el comportamiento de nuestra instalación de alumbrado con las soluciones localizadas en el mercado, en cuanto a lámparas –luminarias-, con sus potencias (W), y flujos lumínicos (lux) necesarios para cada cultivo, en nuestro caso la patata.

2.3. Dimensionado.

Una vez determinado el entorno –estructura-, el cultivo de referencia y el software de referencia, se debe definir/dimensionar todos los parámetros o necesidades lumínicas del cultivo propuesto, siendo esta la patata (Solanum tuberosum). Revisando bibliografía se determinará que la luz máxima demandada por algunas variedades de patata puede ascender hasta 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [5], en nuestro caso, no se conoce la demanda máxima de nuestra variedad, por lo que se tomará como referencia de diseño el valor de 700 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Teniendo en cuenta que el programa tomado como referencia DialuxEVO, nos da los niveles de iluminación en lux, y que los parámetros que definen las necesidades lumínicas de nuestro cultivo viene dado en $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, se hace necesario algún procedimiento que nos permita interpretar los modelos y valores obtenidos por DialuxEVO, para ello se utilizará el procedimiento de Sipos [8], el cual permite estimar el factor de conversión de lux a partir de $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$., o lo que es lo mismo, poder valorar si realmente nuestra fuente lumínica está aportando la cantidad de luz necesaria.

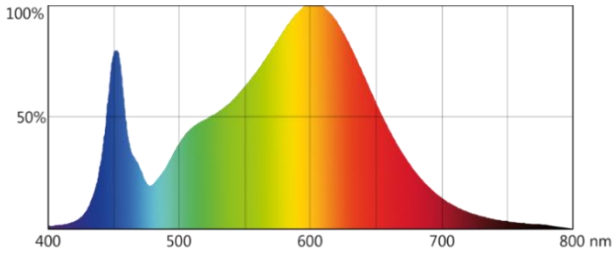


Figura 2. Espectro de emisión para lámparas con temperatura de color de 3000K [6]

Antes de aplicar el procedimiento [8], se debe conocer que el flujo de fotones fotosintéticamente activos (PPFD) se define como la cantidad de fotones en el rango de 400 a 700 nm que impactan en una superficie por unidad de tiempo y área ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), como se observa en la Figura 2. Matemáticamente, el PPFD se calcula como una integral en el dominio del espectro [7].

$$PPFD = \int_{400}^{700} \Phi(\lambda) \cdot AS(\lambda)\, d\lambda \qquad (1)$$

donde Φ es la distribución espectral de potencia y AS la eficiencia fotosintética relativa de cada longitud de onda. A partir de los datos obtenidos por el fabricante Hispania [9] para una lámpara de 3000K –véase Tabla 1-, se aplicará el procedimiento para la obtención del factor de conversión. La lámpara elegida será de 3000K, por tener un rango cercano al espectro rojo, necesario para la patata.

Tabla 1. Longitudes de onda (λ), distribución de potencia espectral (SPD) y espectro de acción (AS), para una lámpara LED de 3000 K de temperatura de color [9]

λ (nm)	SPD (W/nm)	AS
400	0,05	0,25
500	0,15	0,75
600	0,4	0,9
700	0,2	0,6

Los lux producidos por la lámpara se calculan de semejante manera.

$$LUXES = \int_{400}^{700} \Phi(\lambda)\, d\lambda \qquad (2)$$

A la hora del cálculo se simplificarán estas integrales a modo de sumatorio, pues se desconocen las funciones mencionadas, disponiéndose solo de valores puntuales expuestos en la Tabla 1.

$$PPFD = \int_{400}^{700} \Phi(\lambda) \cdot AS(\lambda)\, d\lambda \approx \sum SPD_i \cdot AS_i \qquad (3)$$

De igual modo se procederá para el cálculo de LUXES.

$$LUXES = \int_{400}^{700} \Phi(\lambda)\, d\lambda \approx \sum SPD_i \qquad (4)$$

Donde el factor de conversión (fc) se calcula como el cociente de ambos sumatorios.

$$f_c = \frac{\sum(SPD \cdot AS)}{\sum SPD} \approx 0{,}76 \qquad (5)$$

A partir del valor obtenido en (5) como factor de conversión, y del flujo de fotones fotosintéticamente activos máximo (PPFD) necesario para la patata que son de unos 680 μmol·m^{-2}·s^{-1}., se obtiene el valor de referencia requerido en luxes, valor que directamente se podrá obtener del software DialuxEVO.

$$LUXES = \frac{PPFD}{f_c} = 900\ lux \qquad (6)$$

Se observa que el valor de los luxes necesario serán aproximadamente 900 lux, para abastecer al cultivo de patata en su totalidad.

Tras una amplia búsqueda entre los fabricantes, se obtuvo finalmente con un consumo limitado, coste bajo y temperatura de color (IRC) de 3000 o 4000K, se escoge como opción óptima una luminaria con forma de campana, y cuyas características técnicas se reflejan en la tabla 2, tal y como se abordará en el siguiente apartado.

Tabla 2. Características técnicas de lampara seleccionada [9]

Característica	**Valor**
Potencia LED	50W ±1%
Tono de luz	CCT (3000K + 4000K + 6000K),
Eficiencia luminaria	120 lm/W
Luminosidad (Lm)	6.000 ± 5%

3. Resultados

A partir de la luminaria tomada como referencia se procede a la modelización en DialuxEVO. Dado que la estructura de partida consta de 5 cerchas expresamente colocadas para la iluminación. Tras valorar diversas disposiciones sobre las limitaciones definidas, se llega a una disposición de 7 luminarias por cercha, obteniendo así la distribución lumínica reflejada en la figura 3.a en lux. Con esta disposición se cubre la situación más desfavorable, que sería aquella que se produce cuando el aporte de luz natural sea nula o casi nula, esta situación se puede dar cuando se tenga la estructura totalmente cerrada, necesidad de luz en momentos que no lo hubiera, etc. Como se comentó con anterioridad ese nivel medio del orden de 900 lux era equivalente a los 680 μmol·m^{-2}·s^{-1}, que se necesitan como máximo.

Por control del apagado y encendido de las correspondientes luminarias, se conseguirá un aporte de luz artificial que busque complementar la posible existencia de una luz natural insuficiente, de forma que como se muestra en la figura 3.b, un simple apagado alternado de nuestras luminarias de cada cercha, pasando cada cercha de 7 a 4 luminarias, se consigue un nivel de iluminación máximo del orden de la mitad.

En base a esos resultados, se define un sistema de control basado en apagados y encendidos de luminarias, -ya que las luminarias elegidas finalmente no tienen regulación del flujo luminoso-, y a partir de las lecturas de PAR de la cantidad de luz que llega a nuestro cultivo, para conseguir que el nivel de luz que llegue al cultivo esté lo más cercano en cada momento (fotoperiodo) a su valor ideal.

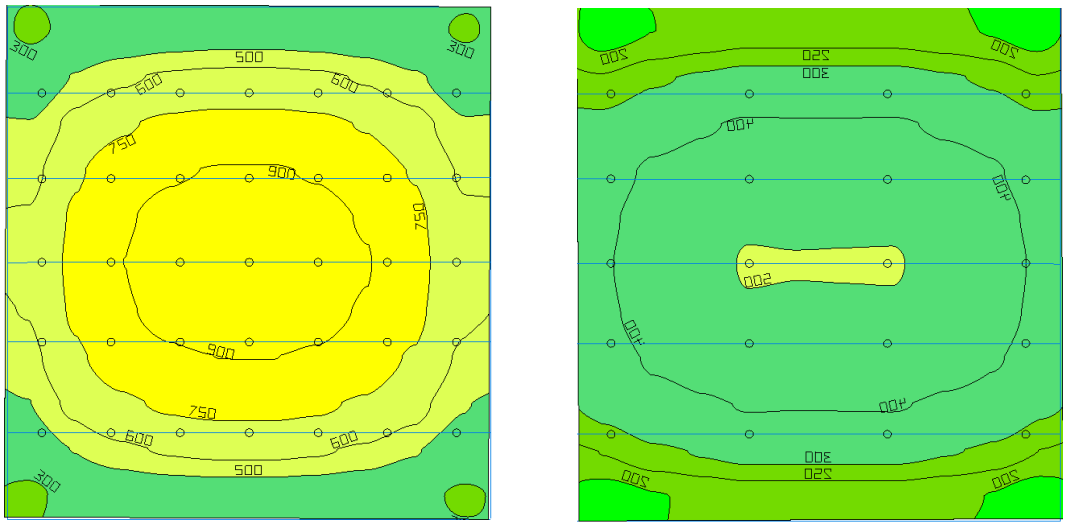


Figura 3. a) Distribución lumínica en lux, para 7 lampara encendidas por cercha (imagen izquierda) y b) para 4 lámparas con encendido como el mostrado en la figura (imagen derecha).

Para ambos cálculos se considera una altura de cultivo máxima de 20 cm y una altura desde el suelo a la cercha de 4,20 m, teniendo pues una distancia teórica de la fuente de luz a la planta de 4 m.

4. Conclusión

En síntesis, se obtiene un modelado que genera las necesidades máximas requeridas por nuestro cultivo de patata. Habiendo fijado como techo los 900 lux máximos requeridos, y con capacidad de regulación a aproximadamente a la mitad fácilmente, lo cual supone aproximadamente 380 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [8], suplementados correctamente con una disposición de 4 luminarias encendidas de las 7 luminarias existentes por cercha, ilustrado en la Figura 2.b.

Cabe destacar que este diseño está pensado para aportar íntegramente los requerimientos lumínicos de la planta propuesta, pero en la aplicación de campo, todo este sistema va a tener especialmente una función complementaria a los aportes lumínicos naturales provenientes desde el sol. Ya que en ciertos momentos las placas se solaparán alternativamente, permitiendo el paso de radiación solar. Dejando a su vez zonas sombreadas, en las que las lámparas añadirán esa energía restante.

Con respecto a aquellos aspectos relacionados el consumo energético y la eficiencia lumínica, y por ende, aquellos relacionados con la viabilidad de la instalación. Hay que indicar que, encontrar fuentes lumínicas que cumplieras las restricciones de longitudes de onda, potencia y precio, no fue tarea simple.

Con respecto a posibles líneas de futuro, es importante indicar que, las posibilidades de implantar este tipo de instalaciones de alumbrado, va a mejorar en la medida que las tecnologías de la iluminación -básicamente LED actualmente-, mejoren en aspectos relacionados con el costo económico de nuestras luminarias y del consumo que hoy por hoy tiene cada una de estas luminarias, ya que la capacidad de regulación presente en las mismas está muy lograda a fecha de hoy.

Financiación: VOLTAGRO. Proyecto financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU en el marco de las convocatorias de ayudas destinadas a proyectos de desarrollo y otras tecnologías digitales y su implantación e integración en cultivos y el sector agrario. C007-24JL

Referencias

1. La Región en cifras. https://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=1619&IDTIPO=100&RASTRO=c$m25987,127,1604 (2025, marzo 20)
2. Nájera, C.; Gallegos-Cedillo, V.M.; Ros, M.; Pascual, J.A. LED Lighting in Vertical Farming Systems Enhances Bioactive Compounds and Productivity of Vegetables Crops. *Biol. Life Sci. Forum* **2022**, *16*, 24. https://doi.org/10.3390/IECHo2022-12514
3. N. Grazziotin, G. Buriol, G. R. Silveira, D. H. Thomas and M. A. D. Costa, "LED Lighting Systems with Dedicated Light Spectra Applied to Flower Cultivation," *2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Nashville, TN, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IAS54024.2023.10406508.
4. E. Goto, (2003) "Effects_of_Light_Quality_on_Growth_of_Crop_Plants_under_Artificial_Lighting", *Environment Control in Biology,* vol. 41, pp 121-132, /doi.org/10.2525/ecb1963.41.121.
5. Rahman, M.H.; Islam, M.J.; Mumu, U.H.; Ryu, B.-R.; Lim, J.-D.; Azad, M.O.K.; Cheong, E.J.; Lim, Y.-S. The Growth and Tuber Yield of Potatoes (*Solanum tuberosum* L.) under Varying LED Light Spectrums in Controlled Greenhouse Conditions. *Horticulturae* **2024**, *10*, 254. https://doi.org/10.3390/horticulturae10030254
6. Planificación de la iluminación de las plantas | Crescience. https://cre.science/es/lonas-de-iluminacion-para-plantas/ (2025, marzo 10).
7. Thimijan, R. W., & Heins, R. D. (1983). Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. HortScience, 18(6), 818-822. Retrieved Mar 24, 2025, https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818

8. Sipos, L., Boros, I. F., Csambalik, L., Székely, G., Jung, A., & Balázs, L. (2020). Horticultural lighting system optimalization: A review. Scientia Horticulturae, 273, Article 109631. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631
9. LED Hispania. (2025). LED Hispania. https://ledhispania.com (2025, marzo 10)

Integración de paneles fotovoltaicos dispuestos verticalmente con cultivos de secano en la Península Ibérica

Guillermo-Pedro Moreda-Cantero[1,3], Luis Juana-Sirgado[2,3], Raúl Sánchez-Calvo[2,3], Delia Rodríguez Lucas[4] y Miguel-Ángel Muñoz-García[1,3*]

[1] LPF-TAGRALIA, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España

[2] Hidráulica del Riego, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España

[3] ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, Spain

[4] EKILABS Corp

* Correspondencia: miguelangel.munoz@upm.es

Resumen: En este trabajo se realiza un análisis de dos configuraciones distintas de paneles solares fotovoltaicos intercalados con el cultivo, en lo que se conoce como sistemas agrivoltaicos, desde una perspectiva tanto de la producción eléctrica y agrícola, como de las ventajas e inconvenientes que puedan presentarse. Se estudian sistemas sin seguimiento, por su mayor sencillez y menor coste, con distintas configuraciones de paneles mono y bifaciales y distintas orientaciones y formato de instalación. Los sistemas de paneles verticales orientados norte-sur permiten una distribución más homogénea de la irradiación solar durante todo el día, lo que mejora la eficiencia en la fotosíntesis de cultivos sensibles a la variabilidad de la luz. Esta configuración es particularmente beneficiosa en cultivos extensivos, ya que no limita la posibilidad de mecanizar las labores con maquinaria de alta capacidad de trabajo. El rendimiento energético de estos sistemas está estrechamente relacionado con el albedo del suelo, siendo más eficiente en suelos de alta reflectancia, que incrementan la irradiación capturada por el lado posterior de los paneles bifaciales. Por otro lado, los sistemas de paneles fijos con inclinación este-oeste ofrecen una solución económica y sencilla desde el punto de vista de la instalación, con costes reducidos en comparación con sistemas con seguimiento. Sin embargo, la distribución de la radiación sobre el cultivo no es óptima durante las horas intermedias del día, lo que puede afectar a la productividad de ciertos cultivos.

Palabras clave: Agrivoltaica; Energía solar; Fotovoltaica; Transición energética; Dual land use

1. Introducción

En los últimos años, la agricultura de regadío ha incorporado la energía solar fotovoltaica como fuente de energía para los equipos de bombeo, tanto a nivel de pequeño agricultor como de grandes comunidades de regantes. Al mismo tiempo, muchos países han aumentado considerablemente la potencia fotovoltaica instalada en parques solares, y muchos ciudadanos han instalado paneles fotovoltaicos en el tejado de sus casas para reducir su factura eléctrica. Debido a la necesidad de frenar el aumento de la temperatura media de nuestro planeta, la

capacidad fotovoltaica instalada seguirá aumentando, pudiendo llegar a competir con el uso agrícola de la tierra.

En 1982, Goetzberger y Zastrow [1] propusieron la cohabitación de paneles de energía solar fotovoltaica y cultivos en un mismo terreno. Aunque en las décadas siguientes la idea quedó aparcada, desde ca. 2010 se ha retomado, habiéndose acuñado el término de sistemas agrivoltaicos o agro-fotovoltaicos, implementado diversas instalaciones de este tipo e incluso regulado normativamente al respecto en diferentes países.

En comparación con arquitecturas agro-fotovoltaicas de tipo 'pérgolas' o 'marquesinas' como la diseñada por Schindele et al. [2], donde los paneles fotovoltaicos, ya sean monofaciales o bifaciales se disponen inclinados óptimamente con orientación Sur y elevados varios metros sobre el suelo, los sistemas de paneles bifaciales verticales [3,4] presentan una serie de ventajas, como maximización de producción eléctrica en las primeras y últimas horas de luz solar, abaratamiento de la estructura de soporte de los paneles fotovoltaicos, buena adaptabilidad a terrenos ondulados o menor acumulación de polvo [5]. Maximizar la producción eléctrica en las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde conlleva indudables beneficios económicos para el generador ya que, en el Mercado Ibérico mayorista de la Electricidad, el precio del kilovatio-hora es más elevado en esas franjas horarias.

En 2023, Hayibo y Pearce [6] propusieron una variante del sistema de paneles verticales, en el que estos pueden oscilar libremente en torno a su arista superior, como si de ropa colgada en un tendedero se tratase. De esta forma, los paneles solo estarían perfectamente verticales en ausencia de viento, viniendo su ángulo de desviación respecto a la vertical determinado por la velocidad y dirección del viento. Hayibo y Pearce [6] estimaron que ese sistema generaría un 12% más de energía eléctrica que su contraparte de paneles verticales fijos. No obstante, la implementación práctica de ese sistema podría acarrear diversos problemas, principalmente riesgo de colisión de los paneles con la maquinaria agrícola en condiciones de viento racheado.

El objetivo de nuestro trabajo es identificar las principales ventajas e inconvenientes de diferentes diseños de estructuras de paneles fotovoltaicos, todas ellas fijas o estáticas (i.e., no dotadas de equipamiento electromecánico ni manual de seguimiento solar) que hagan que la planta fotovoltaica produzca más en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde. Para ello se comparan paneles verticales bifaciales fijos enfrentados al Este-Oeste (vallas fotovoltaicas alineadas en dirección Norte-Sur), paneles enfrentados al Este-Oeste sobre estructura delta-

mayúscula o “tejadillo” (diedro en V invertida o “ala delta”), y paneles enfrentados al Este-Oeste sobre estructura en V.

2. Materiales y Métodos

El diseño agrivoltaico de paneles fotovoltaicos verticales mostrado en la Figura 1 es el que por comodidad vamos a denominar valla fotovoltaica. Además de las ventajas enumeradas más arriba, desde el punto de vista de la mecanización de cultivos extensivos como los cereales de invierno, la amplia separación entre filas de paneles que permite el sistema de valla fotovoltaica [4] favorece el poder recolectar con cosechadoras de cereal de gran anchura de cabezal (hasta 13,8 m en un modelo de la marca CLAAS) y gran capacidad de trabajo (ha/h). En cuanto a la operación de fertilización con abonadora centrífuga de discos, que permite grandes anchos de trabajo o distancia entre ejes de pasadas del tractor, un gran espaciamiento entre las líneas de paneles FV verticales o vallas fotovoltaicas es sinérgico con dicha operación de cultivo. No obstante, existe la posibilidad de impacto de gránulos de fertilizante sólido proyectados por la abonadora contra los paneles FV, por lo que en la fase de diseño se debe tener en cuenta a la hora de establecer la altura libre bajo los paneles. Además, no se debe posponer demasiado la aplicación del abonado de cobertera, para que el cereal no haya adquirido un porte que obligue a subir la altura de la abonadora en el enganche al tractor, lo cual conllevaría una mayor probabilidad de impacto de los gránulos contra los paneles FV. Aunque el vidrio templado que protege a las células solares en principio tiene resistencia mecánica y química frente a los corrosivos gránulos de fertilizante mineral, y el aluminio del marco de los paneles también resiste bien (a diferencia de otros metales como el acero, fuertemente atacados por los abonos), este aspecto podría llegar a ser delicado.

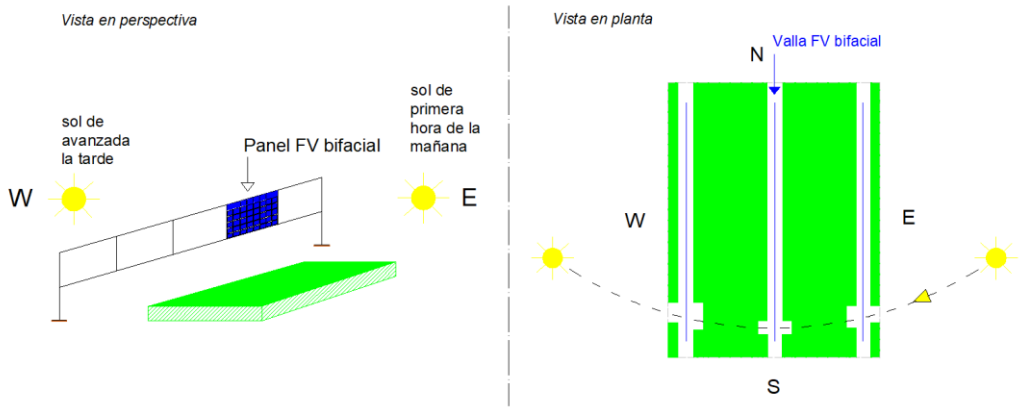


Figura 1 Concepto de paneles fotovoltaicos bifaciales verticales integrados con un cultivo. En la vista en perspectiva no se ha representado el cultivo del lado oeste en aras de la claridad del dibujo. La vista en planta incluye una simplificación de la trayectoria aparente del Sol en invierno, para un emplazamiento en el hemisferio norte.

En la Figura 2 se han representado dos posibles disposiciones de la configuración de paneles verticales: “tumbados” o disposición apaisada (Figura 2, arriba), y ‘de pie’ o en vertical (Figura 2, abajo). En ambos casos se consigue cubrir una longitud de 10 m con 10 paneles. Una diferencia entre la Figura 1-izquierda y la Figura 2-arriba es que los paneles dibujados en la Figura 1, aunque están apaisados, solo hay una altura o “piso” de ellos, frente a dos que hay en la Figura 2. Uno u otro diseño afecta a la distancia mínima recomendable entre vallas, en base al sombreado provocado por una valla sobre la valla más próxima (efecto conocido como autosombreado en diseño de plantas fotovoltaicas). En general, hasta la fecha, la configuración apaisada ha encontrado más aceptación [7].

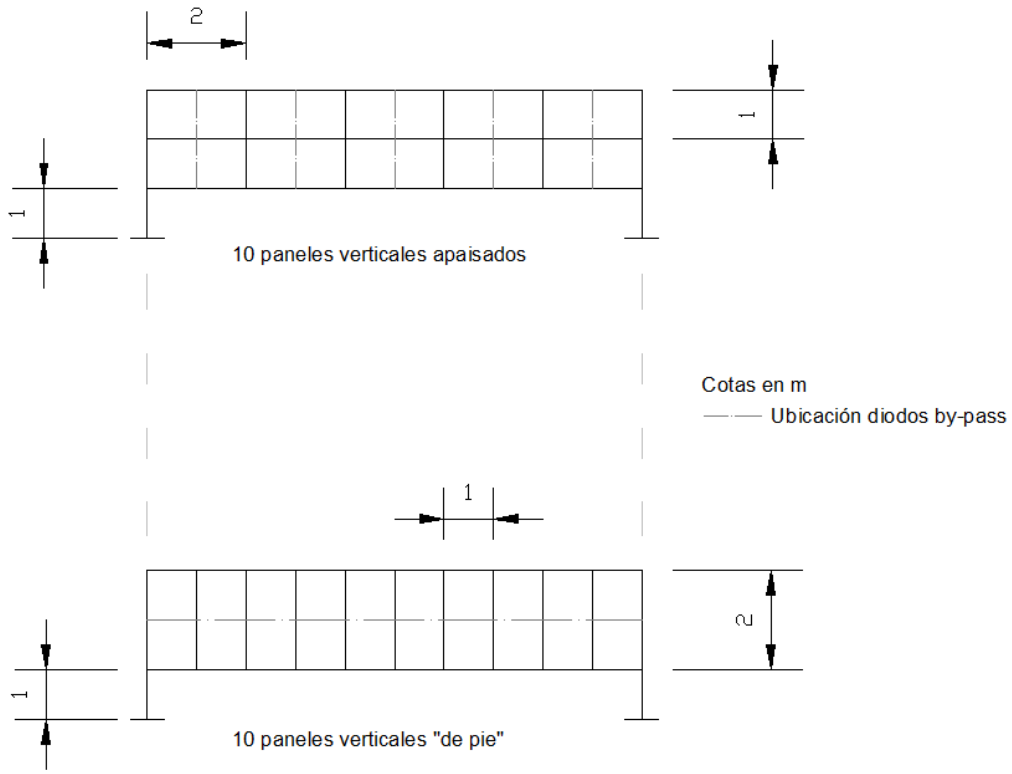


Figura 2 Sistema de valla FV: Dos posibles disposiciones de paneles bifaciales verticales alineados N-S, es decir, con las caras frontal y posterior de los paneles enfrentadas al E-W: Arriba, en disposición apaisada; abajo, en disposición vertical o ‘de pie’.

En relación con el autosombreado de las vallas FV, un aspecto relevante a considerar es la ubicación de los diodos que protegen al panel fotovoltaico del fenómeno del punto caliente, los diodos de derivación o diodos by-pass. El fenómeno de punto caliente se refiere al calentamiento que puede experimentar una célula solar cuando queda sombreada, al convertirse en esa situación en un receptor al que se dirige la corriente generada por las células iluminadas o no-sombreadas. En ambas subfiguras de la Figura 2 (arriba, abajo) se ha dibujado con línea discontinua de trazo

largo-punto la alineación donde se ubican esos diodos en un panel FV de última generación. Correspondientemente, las células de cada panel se distribuyen en líneas paralelas al lado largo del panel. Ello conlleva un comportamiento eléctrico diferente cuando se produce sombreado de las células del panel que se encuentran a cota más baja, es decir, más cerca del suelo. En general, la disposición apaisada debería verse favorecida, ya que, ante el sombreado de una fila de células y la subsiguiente activación del diodo protector correspondiente, las filas de células situadas a mayor cota no se ven afectadas, por lo que la producción del panel se ve poco afectada. Sin embargo, en el caso de la disposición "de pie", el sombreado afecta a la vez a todas las filas de células, con lo que la producción del panel se resiente mucho más. En nuestro caso, no obstante, la amplia separación entre vallas FV minimiza el impacto de este efecto. La Figura 3 muestra la estructura de valla FV instalada en Zamora (España). Como se aprecia en dicha imagen, la alineación N-S del eje longitudinal de la valla coincide sensiblemente con la línea de máxima pendiente del terreno, prueba de la buena adaptabilidad de este sistema a terrenos ondulados señalada anteriormente. Una diferencia del sistema instalado con el esquematizado en la Figura 2-abajo es que el montaje incluye una pequeña separación, de unos 2 cm, entre aristas verticales de paneles contiguos, que alivia parcialmente la carga de viento sobre el conjunto de paneles. En cuanto a la cimentación de la estructura portante, se ha efectuado sin utilizar hormigón, mediante un sistema especial de anclaje.

Figura 3 *Sistema de paneles bifaciales verticales instalados en Zamora, España.*

En la Figura se han representado el diseño en V (Figura 4, arriba) y el diseño en "tejadillo" o V-invertida (Figura 4, abajo). En ambos casos las caras de los paneles fotovoltaicos quedan enfrentadas al Este-Oeste. Suponiendo una distancia

longitudinal a cubrir de 10 m, como en la Figura 2, y disposición “de pie”, tanto para la estructura V como la V invertida, se tendría un total de 20 paneles en cada estructura, el doble de lo correspondiente a la valla fotovoltaica (Figura 2). Ello no quiere decir que la producción sea el doble, ya que las caras de los diedros quedan parcialmente ocultas a la radiación directa en diferentes momentos del día. En todo caso, un parámetro de diseño que determina fuertemente la producción esperable es el ángulo de la V o de la V invertida. En nuestro caso la comparación será con la disposición en V.

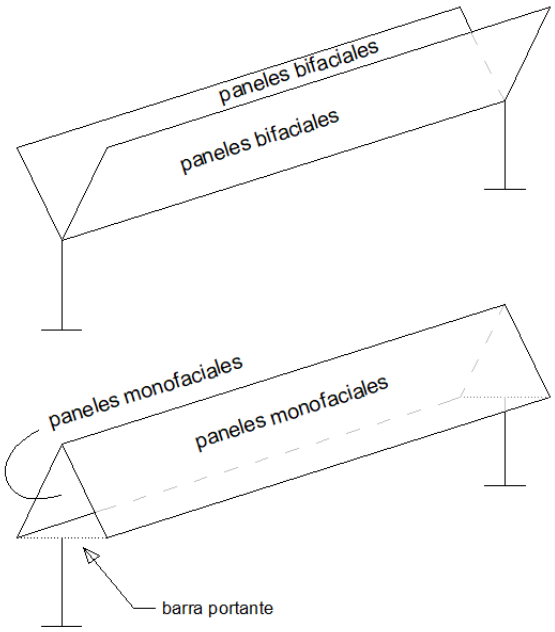


Figura 4 Estructuras fotovoltaicas alineadas en dirección N-S en forma de V (arriba) y de V-invertida (abajo), en las que las caras de los paneles quedan enfrentadas al Este-Oeste.

En plantas fotovoltaicas sobre cubierta plana destinadas típicamente a autoconsumo de naves industriales, en los últimos años se ha producido un aumento considerable de la disposición en V invertida con un ángulo muy abierto, asociado a orientación E-W, de forma que se aprovecha muy bien la superficie de tejado disponible y se consigue una aerodinamicidad muy buena, es decir, los paneles ofrecen poca resistencia al viento. Las naves industriales con ese diseño de estructura portante de los paneles FV asemejan a una sucesión de crestas y valles. No obstante, en nuestro caso un ángulo tan abierto de la V invertida no sería recomendable, ya que el objetivo en el caso agrivoltaico no es conseguir una alta densidad superficial de paneles, sino dejar pasillos para que el cultivo no resulte demasiado sombreado.

3. Resultados

Una diferencia importante entre la disposición en V y en V-invertida (Figura 4), es que la disposición en V se adapta bien al empleo de paneles bifaciales, a diferencia de la disposición en V invertida o delta mayúscula (), donde en principio carece de sentido utilizar paneles bifaciales. Por tanto, atendiendo exclusivamente a este aspecto, cabe esperar mayor producción eléctrica en el diseño en V, de ahí que la estructura en V (Figura 4, arriba) sea la elegida para la comparación con la estructura de valla FV (Figura 2, abajo). Además, la disposición en V permite montar el mismo tipo de panel bifacial que la valla FV.

Los datos obtenidos hasta la fecha con el sistema de valla FV instalado (Figura 3) sugieren que hay un efecto beneficioso consistente en una mejor refrigeración de los paneles en comparación con un sistema convencional de paneles orientados al Paralelo Cero con inclinación óptima según latitud. Típicamente, en esas instalaciones convencionales, la radiación reflejada por el suelo recalienta la parte trasera de los paneles, haciendo que todo el panel se recaliente, lo que va en detrimento de su rendimiento. Por el contrario, la disposición vertical de los paneles alivia ese inconveniente. La disposición en V por su parte presenta el inconveniente frente a la valla FV de interferir más con el paso de la maquinaria de cultivo, viniendo la magnitud de dicha interferencia condicionada por el ángulo de abertura de la V y por la altura del vértice de la V medida desde la superficie del suelo.

En la Figura se ha representado la radiación solar capturada en un día de junio por un panel bifacial vertical con factor de bifacialidad del 90%. El factor de bifacialidad se define como el cociente entre la potencia pico de la cara posterior o secundaria del panel bifacial y la potencia pico de la cara principal o frontal. En la misma figura, a efectos comparativos, se ha incluido la curva de radiación interceptada por un panel orientado al Sur con inclinación convencional óptima para la latitud en cuestión.

Como se observa en la Figura , si bien la disposición vertical bifacial no llega a producir tanto como la orientación sur convencional, su producción se acopla muy bien con los momentos del día en que el precio obtenido por la venta de la electricidad generada es más ventajoso.

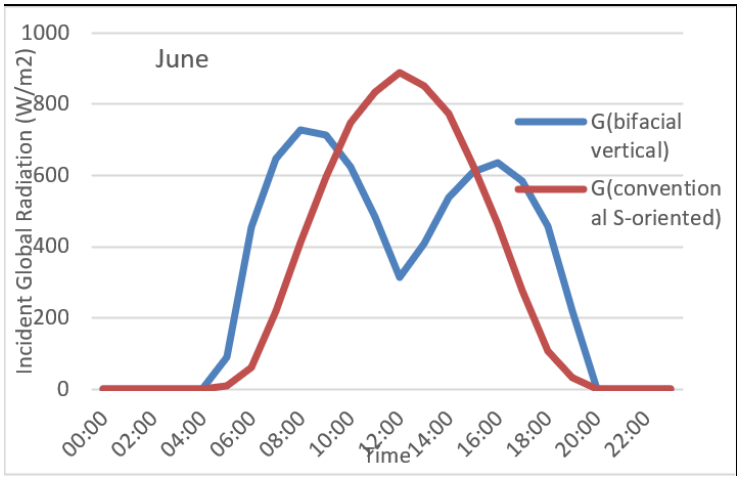


Figura 5 Estimación PVGIS de la radiación solar capturada a lo largo de un día de junio por un panel FV bifacial vertical con un factor de bifacialidad del 90% en Zamora, España; hora UTC.

4. Discusión

El hecho de que en la Figura el pico de radiación interceptada y por tanto de producción a primera hora de la mañana supere a última hora de la tarde se debe a que la cara principal o frontal del panel bifacial está orientada al Este. Además, la Figura corresponde al mes de junio, donde al amanecer no suele haber bancos de niebla. En otras épocas del año, unas nieblas matinales locales persistentes, que no se disipen hasta avanzada la mañana, podrían repercutir negativamente en la producción de la cara del panel que mira al Este, debido a que la niebla conlleva una disminución en la radiación directa que incide en el panel fotovoltaico.

La estructura en V invertida o delta mayúscula (□) ha sido propuesta por Almeida et al. [8] para riego fotovoltaico como alternativa estática al seguidor horizontal a un eje N-S, basándose en que la curva diaria de radiación interceptada es igual de constante en ambos diseños. Comparado con el diseño convencional estático de paneles orientados hacia el Paralelo Cero e inclinados óptimamente en función de la latitud, la producción eléctrica de la configuración delta es menor, pero más constante. En cuanto a la estructura en V, menos estudiada hasta la fecha, su análisis detallado está siendo llevado a cabo actualmente y en futuro trabajo se expondrán los principales resultados obtenidos.

Contribuciones del autor: Conceptualización, M.-Á.M.-G. y G.P.M-C.; metodología, M.-Á.M.-G., G.P.M.-C y L.J.-S..; validación, M.-Á.M.-G., L.J.-S. y G.P.M-C.; análisis formal, R.S.C., L.J.-S. y G.P.M.-C.; investigación, M.-Á.M.-G., L.J.-S., G.P.M.-C., R.S.C. y D.R.-L.; recursos, R.S.C., L.J.S., D.R.-L. y M.-Á.M.-G.; curación de datos, M.-Á.M.-G. y G.P.M.-C.; redacción—preparación del borrador original, G.P.M-C. y M.-Á.M.-G.; Redacción: revisión y edición, M.-Á.M.-G. y G.P.M-C.; visualización, L.J.-S. y D.R.-L.; supervisión, L.J.-S. y D.R.-L..; búsqueda de financiación, L.J.-S., M.-Á.M.-G. y D.R.-L.; Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Este trabajo ha sido financiado parcialmente con la ayuda obtenida para los proyectos PID2023-147841OB-C21 y PID2023-147841OB-C22, financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la "Unión Europea NextGenerationEU/PRTR".

PID2023-147841OB-C21:Improvement in the energy efficiency of pressurized irrigation distribution networks through booster pumping in hydrants made feasible with solar photovoltaic power generation (TRICERATOPSES).

PID2023-147841OB-C22: Use of emerging photovoltaic technologies for booster pumping in hydrants adapted to the crop water requirements and the characteristics of the distribution. (EmerPVpump).

Declaración de disponibilidad de datos: Datos disponibles a petición.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Goetzberger, A.; Zastrow, A. (1982). On the co-existence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1: 55-69.
2. Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., et al. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265: 114737.
3. Lee, S.M., Lee, E.C., Lee, J.H., Yu, S.H., Heo, J.S., et al. (2023). Analysis of the output characteristics of a vertical photovoltaic system based on operational data: A case study in Republic of Korea. *Energies*, 16: 6971.
4. Baricchio , M., Korevaar, M., Babal, P., Ziar, H. (2024). Modelling of bifacial photovoltaic farms to evaluate the profitability of East/West vertical configuration. *Solar Energy*, 272: 112457.
5. Moreda, G.P., Sánchez-Calvo, R., Juana, L., Rodríguez-Lucas, D., Muñoz-García, M.A. (2024). Analysis of the use of bifacial solar panels in vertical placement and their temporal coupling in agrivoltaic irrigation. 41st EUPVSEC. Vienna, Austria. 4DV.1.4.
6. Hayibo, K.S.; Pearce, J.M. (2023). Vertical free-swinging photovoltaic racking energy modeling: A novel approach to agrivoltaics. *Renewable Energy*, 218: 119343.
7. Rucker, W.R.; Birnie III, D.P. (2023). Predicting the performance of portrait-aligned vertical bifacial agrivoltaic arrays. *Solar Energy*, 265: 112119.
8. Almeida, R.H., Narvarte, L., Lorenzo, E. (2018). PV arrays with delta structures for constant irradiance daily profiles. *Solar Energy*, 171: 23-30.

Agrivoltaica en el entorno periurbano de Pamplona para mejorar la relación entre la ciudad y el campo

Ignacio García [1]* and Benoit Beckers [2]

[1] Institute of Smart Cities (ISC), Department of Engineering, Public University of Navarre (UPNA), Campus Arrosadía, 31006 Pamplona, Spain; ignacio.garcia@unavarra.es

[2] Department of Building and Public Works (BTP ISA), Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), 64600 Anglet, France; benoit.beckers@univ-pau.fr

* Correspondence: ignacio.garcia@unavarra.es; Tel.: +34 948 169689

Abstract: Para 2050, se prevé que el 68% de la población mundial vivirá en zonas urbanas, lo que implicará importantes desafíos en el consumo energético y el uso del suelo. La competencia entre la energía solar fotovoltaica (FV) y la agricultura se ha intensificado, afectando la seguridad alimentaria. Este estudio toma como caso a Pamplona, una ciudad de menos de 500.000 habitantes, utilizando su mapa solar para analizar estas dinámicas. Si bien el potencial FV en tejados puede aportar significativamente a la producción energética, no basta para cubrir todo el consumo eléctrico, lo que obliga a considerar suelos agrícolas para instalaciones FV. Como solución, se propone implementar sistemas agrivoltaicos (AV) en áreas periurbanas. Estos sistemas permiten la producción conjunta de energía solar y alimentos en un mismo espacio, reduciendo la competencia por el suelo. Además, la AV contribuye a un uso más eficiente del territorio, disminuye pérdidas energéticas por transporte y actúa como barrera contra la expansión urbana, protegiendo zonas agrícolas y ecológicas. La experiencia en Pamplona demuestra que esta estrategia es viable y replicable en otras ciudades de tamaño similar, ofreciendo una alternativa sostenible para enfrentar los retos energéticos y agrícolas en un contexto de urbanización creciente.

Keywords: Agrivoltaica; AV; Fotovoltaica; FV; Expansión Urbana; Entorno Periurbano

1. Introducción

1.1. Crecimiento de la población urbana

Durante el último siglo, se ha producido una creciente concentración de población en las ciudades y se espera que esta tendencia continúe. En 2018, la proporción de la población global residente en zonas urbanas superó a la de zonas rurales, alcanzando el 55% [1]. Esta cifra representa un marcado aumento desde el 30% registrado en 1950 y se anticipa que podría ascender al 68% para el año 2050. Sin embargo, el nivel de urbanización, esto es, la proporción de habitantes que viven en

zonas urbanas varía considerablemente entre diferentes regiones del mundo. Al evaluar las regiones con mayor nivel de urbanización, encontramos que Norteamérica lideraba con un 82%, seguida por Latinoamérica y el Caribe con un 81%, Europa con un 74% y Oceanía con un 68%. Contrariamente, Asia y África presentaban niveles más bajos, con aproximadamente un 50% y un 43%, respectivamente.

Entre 1990 y 2018, las ciudades del mundo con más de 300.000 habitantes crecieron a una tasa anual promedio del 1,8%. Precisamente en 2018, casi la mitad de los habitantes urbanos del mundo residían en municipios de menos de 500.000 habitantes, mientras que aproximadamente uno de cada ocho vivía en 33 megaciudades con más de 10 millones de habitantes.

Según estas proyecciones, se podría pensar que las ciudades tienen la capacidad de expandirse indefinidamente en un mundo que, en contraste, es finito. El campo, a menudo percibido desde la perspectiva urbana como un lienzo en blanco, es en realidad el espacio sobre el cual se traza la expansión de las ciudades. Es, por lo tanto, crucial establecer límites al crecimiento urbano para evitar la expansión descontrolada. La creación de zonas de amortiguamiento en el entorno periurbano, como cinturones verdes y áreas agrícolas, y la implementación de regulaciones que desincentiven la expansión excesiva y descontrolada, al tiempo que fomenten la densificación y el uso eficiente del espacio urbano existente, son estrategias fundamentales para este fin.

1.2. Consumo energético global y energías renovables

El aumento de población urbana ha estado asociado con un crecimiento consecuente en el consumo de energía. Más del 80% de la actividad económica global se genera en ciudades que consumen dos tercios de la energía mundial. Este alto consumo está ligado no solo a la necesidad de energía para infraestructura residencial y comercial, sino también para sistemas de transporte y otros servicios urbanos esenciales [2]. Además, se espera que la población urbana crezca en aproximadamente 1,7 mil millones para el año 2050 [3], lo que incrementará aún más la demanda de energía en estos entornos.

La transición energética dirigida a nivel global hacia las energías renovables, con intensidad diferente dependiendo de la región del planeta, ha tomado un carácter de urgencia en respuesta a los crecientes desafíos climáticos y energéticos. En este contexto, la energía fotovoltaica (FV) se ha posicionado como una de las soluciones con mayor proyección de crecimiento. La capacidad global de FV alcanzó los 1.6 TW en 2023, con China y Europa liderando la expansión con 235 GW y 61 GW instalados respectivamente [4]. Precisamente, en 2022, la tecnología FV representaba ya el

4.5% del consumo eléctrico mundial [3]. De acuerdo con las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía, se espera que esta participación se incremente hasta alcanzar el 15% en 2030, equiparándose a la proporción del consumo eléctrico global cubierto por la energía eólica, y se prevé que llegue al 32% para 2050, superando a las demás fuentes de energía renovables y no renovables.

No es sorprendente que la tecnología FV haya experimentado un crecimiento significativo a nivel mundial, considerando las ventajas intrínsecas que ofrece en comparación con otras tecnologías de generación de energía. Una de sus ventajas más relevantes es la capacidad de generar electricidad sin emisiones directas de gases de efecto invernadero durante la fase de operación, contribuyendo a la reducción de las emisiones globales en el sector energético [5]. Adicionalmente, esta tecnología conlleva una reducción de costos a largo plazo, debido tanto a los bajos gastos operativos como a la tendencia decreciente en los costos de producción de los módulos FV [6]. Asimismo, la FV facilita la independencia energética para usuarios residenciales y comerciales, permitiéndoles generar su propia electricidad. Una de sus características más destacadas, especialmente relevante en contextos urbanos, es su escalabilidad, la cual permite instalaciones flexibles desde pequeñas instalaciones en tejados hasta grandes parques solares.

Es evidente que la producción FV depende de las condiciones climáticas y la disponibilidad de radiación solar, lo cual puede derivar en una generación eléctrica inconsistente y variable. Además, el uso intensivo de espacio representa un desafío significativo; las instalaciones FV requieren extensas áreas para su despliegue efectivo, lo cual puede ser problemático en zonas urbanas densamente pobladas o en regiones de alto valor agrícola y ecológico [7].

En el contexto europeo, el Pacto Verde [8] constituye una serie de iniciativas políticas dirigidas a orientar a la UE hacia una transición ecológica. Dentro de este marco, el "Fit for 55" plantea alcanzar una reducción del 55% en las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, en comparación con los niveles de 1990, un paso significativo hacia la meta de neutralidad climática para 2050. Este paquete incluye la propuesta de incrementar la cuota de energías renovables en el consumo energético total de la UE, proponiendo un objetivo de al menos un 42,5% para 2030, con posibilidad de revisión al alza. El progreso hacia la consecución de este objetivo ha sido heterogéneo entre los distintos países de la UE, con un valor medio de la cuota de energías renovables del 25% en el 2023 para toda la Unión.

El aumento de la potencia FV instalada ha intensificado la competencia por el uso del suelo, impactando negativamente las prácticas agrícolas y la seguridad alimentaria. La modularidad de los sistemas FV permite su instalación en una amplia

variedad de ubicaciones y superficies. Principalmente, se distinguen dos tipos de instalaciones: aquellas realizadas sobre las cubiertas de edificios residenciales o industriales y los parques FV instalados directamente sobre el suelo. Son estos últimos los que, en muchos casos, entran en competencia con la agricultura por el uso del terreno. Si bien la información sobre la distribución de instalaciones FV en tejados y en suelo no es de fácil acceso, se dispone de datos detallados sobre las instalaciones realizadas en el ámbito de los sectores residencial, comercial e industrial, que generalmente se ejecutan sobre tejados, así como sobre las instalaciones a gran escala ("utility-scale"), típicamente situadas en suelo. En la UE, la instalación de módulos FV en tejados ha sido la norma predominante, una tendencia que se ha intensificado con la reciente crisis energética. En 2023, los sectores residencial, comercial e industrial experimentaron un aumento considerable, con un crecimiento conjunto del 54% en comparación con el año anterior. El sector comercial e industrial, en particular, vio aumentar su cuota en las nuevas capacidades instaladas al 33%, desde el 29% el año anterior, mientras que el segmento residencial también alcanzó el 33%, pero partiendo de un 31%. El segmento de gran escala experimentó una disminución del 6% en su cuota de mercado en 2023. Sin embargo, estas instalaciones ejecutadas en suelo aún representaron un 34% del total de nuevas instalaciones en la UE [9].

De acuerdo con las proyecciones de SolarPower Europe [9], se espera que la instalación de sistemas FV en tejados y en suelo crezcan significativamente en los próximos años: las adiciones de sistemas en tejados aumentarán un 41%, de 37 GW en 2023 a 52 GW en 2027, y la implementación anual de plantas solares en suelo duplicará, de 19 GW en 2023 a 41 GW en 2027. En términos acumulativos, se prevé que la solar FV a gran escala crecerá de 89,6 GW en 2023 a 222 GW en 2027, lo que equivale a un crecimiento de 4 puntos porcentuales, de una cuota del 44% en 2023 a 48% cuatro años después. Por otro lado, se espera que los tejados aumenten su capacidad instalada de 174 GW a 355 GW, mientras que, en términos relativos, perderán 4 puntos de su cuota del 66% en 2023 al 62% en 2027. En definitiva, las proyecciones actuales apuntan a un incremento sensible de las instalaciones FV en suelo.

2. La producción fotovoltaica de los tejados de Pamplona

Es evidente que el aumento de la potencia FV instalada plantea un dilema en cuanto a la utilización del espacio en zonas urbanas y rurales. En el contexto de las ciudades con menos de 500.000 habitantes, en donde, recordemos, residía la mitad de la población mundial en 2018, hemos seleccionado Pamplona (España) como un ejemplo representativo de este grupo demográfico. Con una población de 203.944

habitantes, esta ciudad permite analizar y comparar sus necesidades globales de energía eléctrica frente a su capacidad para generar energía mediante sistemas FV.

El reciente proyecto de mapeo solar, que utilizamos para cuantificar el potencial de los tejados de Pamplona para la producción de energía solar FV [10], se basó en un modelo digital de superficie que registraba la altura de los terrenos y las edificaciones respecto al nivel del mar, con una resolución de píxel de 2x2 metros. A partir de ahí, determinamos la orientación e inclinación de cada píxel. En el análisis, cada hora de un año meteorológico típico fue examinada para calcular la incidencia de la radiación solar, diferenciando las componentes directa y difusa de la radiación. La evaluación de la radiación directa se basó en una relación geométrica que considera la posición del sol respecto al plano de captación, mientras que el tratamiento de la componente difusa requirió un modelo específico debido al carácter anisotrópico de su distribución en el cielo [11]. Además, se analizó el impacto de los obstáculos circundantes, calculando el perfil del horizonte visible desde cada píxel. Se evaluó continuamente si el sol estaba por encima o por debajo del horizonte, determinando así si un píxel estaría directamente expuesto a la luz solar. También modelamos el efecto de los obstáculos sobre la radiación difusa, aplicando el factor de visión del cielo (SVF, por sus siglas en inglés), y consideramos de manera simplificada la radiación reflejada por elementos del entorno usando un albedo constante. Un modelo de producción FV estimó el potencial de generación eléctrica de cada píxel. La Figura 1 muestra un detalle del resultado, eliminando aquellos píxeles con una productividad FV baja, es decir, aquellos cuya producción de energía eléctrica estaba por debajo del 70% del valor de producción del plano con una orientación e inclinación óptimas.

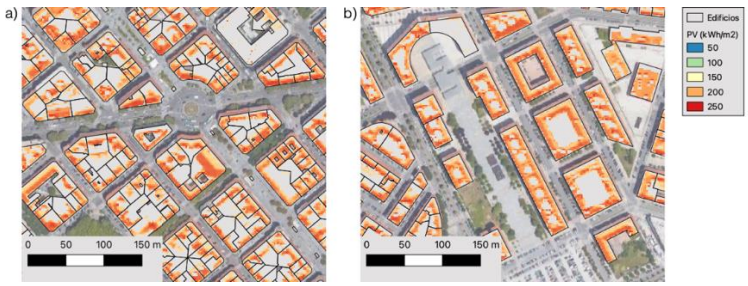


Figura 1. Detalle del mapa de densidades de energía eléctrica FV anual de salida por píxel en dos zonas de Pamplona: el Segundo Ensanche (a) y Rochapea (b).

De acuerdo con el mapa elaborado y según los datos de consumo del año 2019 (el más próximo al año de elaboración del mapa no afectado por el atípico consumo durante pandemia de COVID-19), se obtuvieron las tasas de cobertura de la demanda eléctrica por medio de energía solar FV para los grupos de consumidores ubicados en los 16 distritos postales en los que se divide la ciudad de Pamplona. Para el conjunto de la ciudad, considerando un consumo total de energía eléctrica

anual de 656 GWh y una producción fotovoltaica anual estimada de 503 GWh, se lograría cubrir un 77 % del consumo eléctrico si se utilizaran todas las cubiertas aptas de la ciudad. Teniendo en cuenta la población de Pamplona, que ascendía a 201.653 habitantes en 2019, la ratio de producción fotovoltaica anual fue de 2.494 kWh por habitante. Se comprobó que, en 4 de los 16 distritos postales de la ciudad, el potencial de producción fotovoltaica superaba al consumo eléctrico, destacando particularmente el distrito postal 31012, que alberga la mayor parte del tejido industrial de la ciudad.

Este estudio evidenció que el potencial de los tejados de la ciudad no era suficiente para cubrir el consumo de Pamplona. De manera que, irremisiblemente, sería precisa la instalación de sistemas FV en suelos agrícolas para satisfacer el déficit de energía.

3. Los sistemas agrivoltaicos

En febrero de 2023, los titulares de la prensa generalista en España llamaron la atención de la opinión pública ante un hecho que tuvo lugar en Cartaojal, un pequeño municipio en la provincia de Málaga. Se trató del arranque de 20.000 olivos, algunos de ellos centenarios, para dar paso a la instalación de una serie de parques FV. Este acontecimiento desató un amplio debate sobre la transición energética y sus implicaciones para el patrimonio y la producción agrícola. Los olivos, árboles emblemáticos en el paisaje y la economía mediterránea, representan no solo una fuente de ingresos a través de la producción de aceite de oliva, sino también un componente cultural y ecológico vital para la región. El arranque de estos olivos para instalar parques solares plantea un conflicto entre la preservación de estos valores tradicionales y la necesidad de avanzar hacia fuentes de energía renovables como parte de los esfuerzos para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y cumplir con los compromisos climáticos internacionales.

El caso de Cartaojal es solo un ejemplo de una problemática más amplia a la que se enfrentan muchas regiones agrícolas en el mundo, donde la rápida expansión de la infraestructura de energías renovables a menudo choca con intereses agrícolas y de conservación. En los últimos años, la instalación de sistemas agrivoltaicos (AV), que integran la agricultura con la generación de energía solar FV, se ha popularizado como una solución estratégica al problema de la competencia por la tierra. Esta combinación permite la coexistencia entre la producción agrícola y la generación energética. La AV ofrece ventajas como la eficiencia en el uso del espacio, permitiendo la producción simultánea de alimentos y energía en un mismo espacio. Estos sistemas pueden llegar a incrementar el rendimiento agrícola gracias a condiciones microclimáticas más favorables bajo los módulos FV, que reducen la

necesidad de agua al mantener la humedad del suelo. Esto también protege el suelo contra la desertificación y proporciona a los agricultores una fuente adicional de ingresos mediante la venta de energía.

Los sistemas AV se pueden clasificar en dos categorías principales: sistemas abiertos y cerrados. Los cerrados se refieren esencialmente a invernaderos FV, es decir, invernaderos en los que los módulos FV se han integrado en el techo o las paredes. Los sistemas abiertos se pueden dividir, a su vez, según la configuración de los módulos FV, en dos tipos: AV con espacios intermedios, con cultivo de cosechas entre las filas de módulos FV, y AV de sobrecubierta, que son sistemas en los que las cosechas se cultivan debajo de los módulos FV [12].

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la AV es la competencia por la radiación solar entre la planta y el módulo FV. Las plantas, para realizar la fotosíntesis, utilizan la radiación solar en el rango de 400 a 680 nm (ver Figura 2), conocido como radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés). Por otro lado, la tecnología FV más extendida a nivel mundial, basada en el silicio, posee una respuesta espectral que abarca aproximadamente de 300 a 1200 nm, solapándose con el rango de la PAR, como se aprecia en la Figura 2.

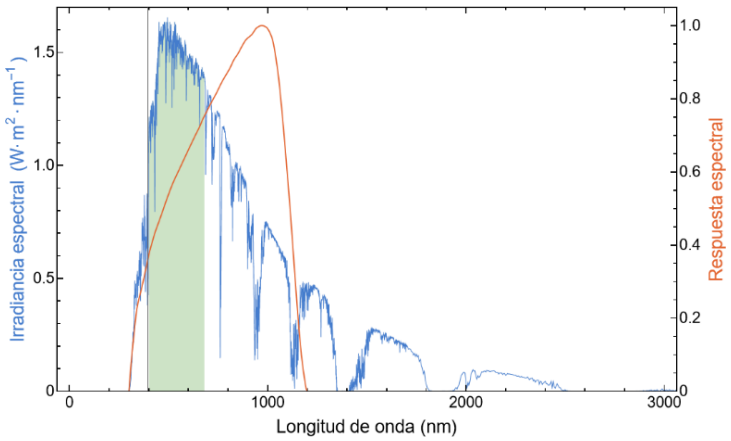


Figura 2. Distribución espectral de la irradiancia correspondiente al espectro de referencia AM1.5 (línea azul) [13] y función de respuesta del silicio monocristalino (línea naranja) [14]. En verde se representa el rango espectral de la PAR. Elaboración propia a partir del Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS) [15].

Una solución es el uso de módulos FV semi-transparentes o selectivos por longitud de onda. Estos sistemas permiten el paso de ciertas longitudes de onda de la radiación solar útiles para la fotosíntesis, mientras absorben otras para la generación de electricidad. Por ejemplo, los módulos FV selectivos UV/NIR absorben principalmente las longitudes de onda ultravioleta y cercana al infrarrojo, que son menos cruciales para la fotosíntesis, permitiendo el paso de la mayoría del espectro visible, esencial para el crecimiento de las plantas. Esto reduce la competencia por la luz visible, facilitando la fotosíntesis eficiente mientras se genera energía. La

tecnología de FV de capa delgada también juega un papel importante. Implementar capas delgadas en los módulos FV con menos material fotoactivo puede incrementar la transparencia de los paneles, permitiendo que una mayor parte del espectro de luz beneficie a las plantas situadas debajo. Además, la configuración y orientación optimizada de los paneles puede maximizar la captura de luz solar para la generación de energía sin sombrear excesivamente las plantas debajo. Esto puede implicar sistemas que ajusten su inclinación durante diferentes épocas del año para adaptarse a la trayectoria del sol, mejorando así la eficiencia del sistema. Por su parte, la integración de sistemas concentradores, que utilizan ópticas para focalizar la luz solar en un receptor pequeño, minimiza el área cubierta por los dispositivos FV. Esto puede dejar más espacio expuesto a la luz solar natural para el crecimiento de las plantas, optimizando aún más la utilización del espacio [12].

Uno de los aspectos más importantes en relación con la AV es la elección de los cultivos adecuados. El principal factor que determina esta selección es la tolerancia de las plantas a la sombra, que es comúnmente evaluada mediante curvas de fotosíntesis-luz (ver Figura 3). Estas curvas representan la respuesta de la tasa de fotosíntesis neta a la PAR. A partir de ellas, se puede determinar la irradiancia de saturación o punto de saturación lumínica, que indica la intensidad de luz en la que la tasa de fotosíntesis neta alcanza su valor máximo. Cuando la irradiancia incidente supera este punto, la planta comienza a sufrir fotoinhibición, es decir, su aparato fotosintético limita la absorción de mayores cantidades de luz para evitar daños. Este fenómeno ocurre con frecuencia en la cuenca mediterránea, donde en verano se alcanzan valores extremadamente altos de irradiancia y temperatura, que pueden impactar negativamente en la producción de los cultivos [16].

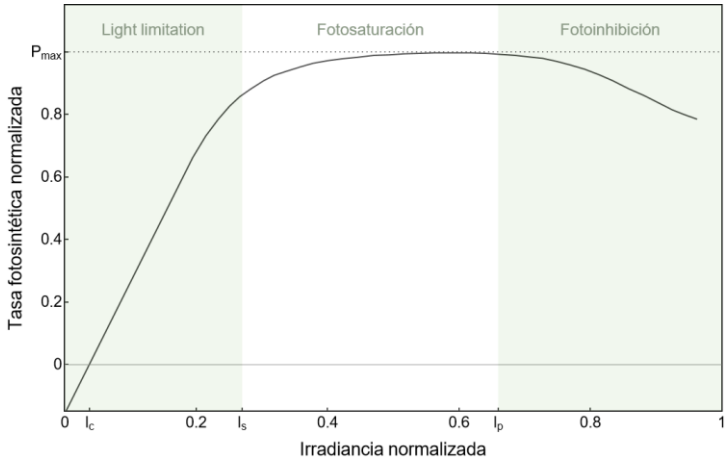


Figura 3. Curva de respuesta fotosintética a la radiación (α: pendiente de la curva, i.e., eficiencia máxima de conversión de luz; P_{max}: tasa máxima de fotosíntesis; I_c: irradiancia de compensación, i.e., equilibrio de O_2 entre fotosíntesis y respiración; I_s: irradiancia de saturación; I_p: irradiancia de fotoinhibición). Elaboración propia.

4. Agrivoltaica en el espacio periurbano

Si bien los sistemas AV ofrecen una solución a la ocupación de tierras cultivables por parte de las instalaciones FV de generación de energía, una vez más surge la cuestión del emplazamiento: ¿dónde deberían realizarse las instalaciones AV que tienen como objetivo suministrar energía eléctrica a las ciudades? Desde este punto de vista, parece razonable ubicarlas en lugares próximos a la propia ciudad. ¿Por qué no en el espacio periurbano?

En general, las ciudades están expandiéndose en la actualidad al doble de la tasa de crecimiento de su población, cubriendo casi el 0,5% de la superficie terrestre del planeta. Según las proyecciones de Angel et al. [17], la cobertura de suelo urbano en el mundo alcanzará los 1.267.200 km^2 en 2030 y los 1.888.936 km^2 en 2050 [17], es decir, un 0,85% y un 1,27% de la superficie terrestre del planeta, respectivamente.

La expansión de las ciudades, determinada en ocasiones por la falta de límites claros, continúa consumiendo terrenos de valor agrícola y ecológico. Esta tendencia no solo transforma el paisaje rural en urbano sin planificación adecuada, sino que también compromete la integridad de ecosistemas cruciales y reduce la disponibilidad de tierra fértil para la agricultura. La ubicación de instalaciones AV en las áreas periurbanas formando un cinturón en torno a la ciudad ofrecería múltiples ventajas que, en definitiva, contribuirían a mejorar la relación entre la ciudad y el campo. Primero, podrían actuar como barreras naturales que limitaran la expansión urbana descontrolada, preservando el carácter y la biodiversidad de las áreas periurbanas. Además, mejorarían la transición visual y funcional entre zonas urbanas y rurales, ofreciendo un paisaje más integrado y armonioso que beneficiaría tanto a la población local como al ecosistema.

Esta estrategia también permitiría maximizar la producción local de energía, reduciendo la dependencia de las importaciones de energía. Además, la proximidad de las instalaciones FV a los principales consumidores en las ciudades asegura una menor pérdida de energía durante el transporte y distribución, optimizando el rendimiento de cada kilovatio generado.

Aunque pueda parecer un aspecto secundario, la visibilidad de las instalaciones AV en el litoral urbano puede jugar un rol crucial en la educación y participación ciudadana en la cuestión del suministro energético. Al tener una interacción visual y directa con la infraestructura de energía renovable, las personas se vuelven más conscientes de su importancia y su papel en la protección de los cultivos cercanos a la ciudad. Esta visibilidad fomenta una mayor responsabilidad ambiental entre los ciudadanos y los empodera para tomar un rol activo en la transición energética. Al observar cómo estas instalaciones protegen activamente los cultivos y cómo

contribuyen a la producción de energía, las comunidades pueden estar más motivadas a adoptar prácticas que apoyen inversiones significativas en infraestructura energética renovable.

5. Conclusiones

En el contexto del crecimiento continuo de la población urbana y la transición necesaria hacia fuentes de energía renovable, este artículo propone la implementación de sistemas AV en el entorno periurbano de Pamplona. Esta estrategia se presenta como una solución práctica a diversos desafíos urbanos y energéticos, especialmente en ciudades de tamaño mediano.

La introducción de la AV cerca de áreas urbanas puede garantizar la disponibilidad de hortalizas de alta calidad. Al ubicar la producción agrícola directamente en las periferias urbanas, se mejora la accesibilidad a productos frescos y se sostiene la agricultura de calidad y proximidad. Este enfoque amortigua la industrialización de la agricultura, preservando técnicas de cultivo tradicionales y reduciendo la necesidad de largas cadenas de suministro. La integración de estos sistemas en el entorno periurbano fortalece la relación entre agricultores y la población urbana. La proximidad física permite una mayor conciencia y apreciación por parte de los urbanitas hacia el trabajo agrícola y la producción de energía a partir de fuentes renovables.

La instalación de sistemas AV también contribuye a prevenir la expansión urbana descontrolada. Al utilizar eficientemente el suelo para la producción combinada de energía y alimentos, estos sistemas limitan la urbanización expansiva, protegiendo terrenos agrícolas valiosos y manteniendo el carácter rural de las áreas periurbanas.

El objetivo principal de esta propuesta es añadir valor al campo mediante una integración efectiva de la agricultura y la generación de energía. Este enfoque no solo fomenta una gestión más eficiente de los recursos, sino que también mejora la relación entre la ciudad y el campo, ofreciendo un modelo sostenible para el desarrollo urbano y energético. La implementación de la AV en el litoral urbano de Pamplona se presenta como un modelo replicable para otras ciudades, ofreciendo un método efectivo para enfrentar de manera conjunta los desafíos energéticos y agrícolas, y mejorando sustancialmente la relación entre ambientes urbanos y rurales.

Author Contributions: Conceptualization, I.G. and B.B.; methodology, I.G. and B.B.; software, I.G.; validation, I.G.; investigation, I.G.; resources, I.G.; data curation, I.G..; writing—original draft preparation, I.G.; writing—review and editing, I.G. and B.B.; visualization, I.G.; supervision, B.B.; project administration, I.G.; funding acquisition, I.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Please add: “This research received no external funding”.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Government of Navarre.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. United Nations *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*; United Nations: New York, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019;
2. World Bank *World Development Report 2024: The Middle-Income Trap*; Washington, DC: World Bank, 2024; ISBN 978-1-4648-2078-6.
3. IEA *World Energy Outlook 2023*; Paris, France, 2023;
4. Masson, G.; Bosch, E.; Van Rechem, A.; De l'Epine, M. *Snapshot 2024*; IEA Photovoltaic Power Systems Programme (FVPS), 2024;
5. Martin A Green Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications. **1982**.
6. Parida, B.; Iniyan, S.; Goic, R. A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 1625–1636, doi:10.1016/j.rser.2010.11.032.
7. Turney, D.; Fthenakis, V. Environmental Impacts from the Installation and Operation of Large-Scale Solar Power Plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 3261–3270, doi:10.1016/j.rser.2011.04.023.
8. European Parliament, & Council of the European Union Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 Amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999, and Directive 98/70/EC in Respect of the Promotion of Energy from Renewable Sources and Repealing Council Directive (EU) 2015/652; 2023;
9. SolarPower Europe EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027. **2023**.
10. García, I.; Prieto, E.; Torres, J.L. Estimation of the Solar Thermal Power Generation Potential in Pamplona (Northern Spain). In Proceedings of the Proceedings of the XII National and III International Conference on Engineering Thermodynamics; Acosta Iborra, A., Marugán Cruz, C., Sánchez Delgado, S., Eds.; Universidad Carlos III de Madrid: Madrid, Spain, 2022; pp. 955–964.
11. Perez, R.; Ineichen, P.; Seals, R.; Michalsky, J.J.; Stewart, R. Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. *Solar Energy* **1990**, *44*, 271–289, doi:10.1016/0038-092X(90)90055-H.
12. Gorjian, S.; Bousi, E.; Özdemir, Ö.E.; Trommsdorff, M.; Kumar, N.M.; Anand, A.; Kant, K.; Chopra, S.S. Progress and Challenges of Crop Production and Electricity Generation in Agrivoltaic Systems Using Semi-Transparent Photovoltaic Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2022**, *158*, 112126, doi:10.1016/j.rser.2022.112126.
13. IEC 60904-3:2019 Photovoltaic Devices - Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (FV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data; Geneva, Switzerland, **2019**.
14. Driesse, A.; Theristis, M.; Stein, J. Global Horizontal Spectral Irradiance and Module Spectral Response Measurements: An Open Dataset for FV Research; 2023; p. SAND--2023-02045, 2293575;
15. Gueymard, C.A. Parameterized Transmittance Model for Direct Beam and Circumsolar Spectral Irradiance. *Solar Energy* **2001**, *71*, 325–346, doi:10.1016/S0038-092X(01)00054-8.
16. Fernández-Solas, Á.; Fernández-Ocaña, A.M.; Almonacid, F.; Fernández, E.F. Potential of Agrivoltaics Systems into Olive Groves in the Mediterranean Region. *Applied Energy* **2023**, *352*, 121988, doi:10.1016/j.apenergy.2023.121988.
17. Angel, S.; Parent, J.; Civco, D.L.; Blei, A.; Potere, D. The Dimensions of Global Urban Expansion: Estimates and Projections for All Countries, 2000–2050. *Progress in Planning* **2011**, *75*, 53–107, doi:10.1016/j.progress.2011.04.001.

Reutilización de paneles solares de segunda vida en sistemas agrivoltaicos

María-Beatriz Nieto-Morone[1,2,3], Guillermo Moreda-Cantero[2,3], David Pérez López[3,4], Ana Centeno[3,4], Carlota Bernal-Basurco[3,4], Félix García Rosillo[1], María del Carmen Alonso-García[1] y Miguel-Ángel Muñoz-García[2,3*]

[1] Unidad de Energía Solar Fotovoltaica, Departamento de Energía, CIEMAT, Av. Complutense, 40, 28040 Madrid, España

[2] LPF-TAGRALIA, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España

[3] ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, Spain

[4] CEIGRAM, Paseo de la Senda del Rey, 13, 28040 Madrid, España

* Correspondencia: miguelangel.munoz@upm.es

Resumen: La integración de la producción agrícola y fotovoltaica, en el concepto denominado agrivoltaica, se torna más sostenible aún cuando se combina con la reutilización de paneles reparados o retirados de otras plantas fotovoltaicas. En nuestro estudio analizamos cómo los módulos fotovoltaicos reutilizados pueden integrarse en un sistema agrovoltaico enfocado a la producción hortícola sostenible, con un enfoque en la eficiencia energética y el rendimiento agrícola.

En el experimento, se instalaron módulos nuevos y parcialmente reparados en campos de tomates en condiciones de operación reales. Aunque los módulos reutilizados mostraron una ligera disminución en los índices de rendimiento, su eficiencia se mantuvo estable, demostrando un rendimiento energético sólido y consistente similar al de los paneles nuevos. Además, la sombra proporcionada por los paneles fotovoltaicos favoreció los cultivos, manteniendo buenos rendimientos.

Este enfoque de economía circular, en el que se aprovechan los módulos fotovoltaicos reutilizados, ofrece una solución sostenible que equilibra la producción de energía y la seguridad alimentaria, optimizando el uso de la tierra.

Los hallazgos de este estudio subrayan el potencial de la agrivoltaica como tecnología clave para promover una transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

El objetivo del trabajo es también ampliar los ensayos para verificar con más datos el funcionamiento a medio plazo de los paneles reutilizados y su impacto tanto en la producción como en la vertiente de sostenibilidad.

Palabras clave: Agrovoltaica; producción hortícola sostenible; módulos fotovoltaicos reutilizados; economía circular en la agricultura

1. Introduction

Un factor clave para optimizar los sistemas agrovoltaicos es la utilización eficiente de todo el espectro solar, especialmente dentro de los rangos visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR), mientras que los demás componentes espectrales, como el ultravioleta (UV) y las longitudes de onda infrarrojas más largas, se subutilizan o se disipan como calor. Sin embargo, el patrón espectral bajo los paneles suele cambiar, modificando su composición, es decir, UV, rojo y verde. Los avances recientes en la utilización de energía solar de espectro completo buscan superar esta limitación mediante la tecnología de división espectral, que separa la luz solar entrante en diferentes bandas de longitud de onda, dirigiendo cada una hacia el mecanismo de conversión más adecuado [1]. Este enfoque maximiza la eficiencia energética al permitir procesos fototérmicos, fotovoltaicos y fotoquímicos simultáneos, mejorando el rendimiento global del sistema. La integración de estas estrategias en la agrovoltaica puede mejorar tanto la productividad agrícola como la generación de energía al optimizar la distribución espectral disponible para los cultivos y la energía fotovoltaica.

Diversos estudios han investigado el rendimiento de diferentes cultivos bajo sistemas agrovoltaicos, enfocándose en parámetros clave como el rendimiento, la eficiencia en el uso del agua y la calidad de los cultivos, considerando variables como tamaño, contenido de nutrientes y resistencia a enfermedades. En particular, Bruhwyler y Feuerbacher et al. demostraron en sus investigaciones que cultivos como el trigo y la lechuga muestran un mejor rendimiento cuando se cultivan bajo arreglos fotovoltaicos debido a los cambios microclimáticos generados por el sombreado de los paneles [2,3]. Otro estudio sobre el cultivo de uvas en sistemas agrovoltaicos evidenció que una exposición moderada a la luz solar y la reducción del estrés hídrico pueden mejorar la eficiencia en el uso del agua y la calidad de la uva [4]. Resultados similares se encontraron en investigaciones sobre el cultivo de chiles y cebollas galesas bajo condiciones controladas de invernadero, donde el sombreado proporcionado por los paneles fotovoltaicos mejoró la calidad del cultivo, manteniendo rendimientos comparables a los obtenidos mediante prácticas agrícolas convencionales [2,5].

2. Materiales y Métodos

2.1. Caracterización del suelo y la instalación agrovoltaica

La instalación agrovoltaica abarcó una superficie aproximada de 65,20 m² y se estableció sobre un suelo clasificado como antrosol, con una profundidad superior a 1,5 metros y estructurado en tres horizontes diferenciados. El primer horizonte, de 0 a 30 cm de profundidad, presentó una textura franco arenosa, con un pH de

7,8, un contenido de materia orgánica del 3,68 % y una concentración de caliza total del 1,3 %. El segundo horizonte, situado entre 30 y 90 cm, conservó la textura franco arenosa, con un pH de 7,9 y un porcentaje de caliza total del 1,5 %. Finalmente, el tercer horizonte, a partir de los 90 cm de profundidad, mantuvo la textura franco arenosa predominante en el perfil edáfico.

El sistema fotovoltaico experimental, con una capacidad total de 9,3 kWp, se diseñó para evaluar el rendimiento de estos módulos en condiciones reales. Se instalaron 30 paneles de silicio monocristalino, orientados al sureste con una inclinación de 25° respecto al eje norte-sur. La instalación combinó 15 paneles nuevos JNMM144-450L de 450 Wp y 15 reacondicionados TopSolar TSM 160M, con una potencia máxima inferior a 170 Wp (Figura 3). Estos últimos, con aproximadamente 12 años de uso, fueron seleccionados por disponibilidad y sometidos a pruebas antes de su reutilización, según nuestro estudio previo [20]. Para su conexión, los módulos se organizaron en seis cadenas de cinco paneles en serie, las cuales luego se conectaron en paralelo para mejorar la eficiencia del sistema. Cada cadena alimentó directamente las entradas de los inversores SAJ R5-5K-T2-15, que cuentan con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para optimizar la producción de energía.

Figura 3 *Plano de situación de los paneles fotovoltaicos nuevos y reutilizados en el campo. Los paneles en azul corresponden a los nuevos, mientras que los representados en verde corresponden a los reutilizados. (Extraído de (Nieto-Morone et al., 2025)[6])*

Gracias a esta configuración, se pudo comparar el desempeño de paneles nuevos y reacondicionados, proporcionando información útil sobre la viabilidad de reutilizar módulos solares en proyectos futuros.

2.2. Condiciones climáticas del emplazamiento

El estudio se llevó a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB) de la Universidad Politécnica de Madrid

(UPM), ubicada en las coordenadas 40°26' N, 3°44' O. Durante el período experimental, se registró una temperatura media de 11,8 °C, con valores extremos de 0,2 °C y 42 °C, mientras que la temperatura máxima promedio se situó en 30,6 °C. La precipitación acumulada fue de 85,2 mm, y la humedad relativa presentó una oscilación significativa, con un valor medio del 49,34 % y un rango comprendido entre el 3,52 % y el 99,98 %.

En cuanto a la dinámica eólica, la velocidad media del viento fue de 1,1 m/s, con una mínima diaria de 0,7 m/s observada los días 2 de agosto y 21 de mayo de 2024, y una máxima de 1,8 m/s el 14 de mayo del mismo año. La dirección predominante del viento fue de 274°, lo que indica un flujo mayoritariamente proveniente del oeste, con una ligera inclinación hacia el noroeste.

2.3. Diseño de la plantación

El 24 de abril de 2024 se llevó a cabo la plantación de tomate (**Solanum lycopersicum L.**, variedad AB8058 de Bayer) en un terreno preparado con caballones de 1,10 m de ancho. En cada caballón se dispusieron dos hileras de plantas separadas 50 cm, con una distancia de 30 cm entre cada planta dentro de la misma hilera, siguiendo un patrón triangular. Para minimizar la proliferación de maleza, los caballones fueron cubiertos con una película plástica de polietileno negro de 1,50 m de ancho.

El espaciamiento entre caballones fue de 60 cm, lo que resultó en una densidad final de **47,619 plantas por hectárea**. Cada parcela experimental tenía un ancho de 8,5 m y los caballones más externos se utilizaron como bordes. Para evitar sesgos en los datos, las mediciones se realizaron en la zona central, dejando al menos 2 m como margen de seguridad.

2.4. Riego y manejo del agua

El sistema de riego utilizado fue por goteo, con una línea de riego instalada a 10 cm del interior de cada hilera, justo debajo de la película plástica. Se emplearon goteros autocompensantes de 4 L/h, espaciados a 30 cm en una tubería de 16 mm de diámetro. El riego fue uniforme para todos los tratamientos, suministrando un total de **242 mm durante toda la temporada**, a pesar de que la demanda hídrica estimada según la FAO era de **369 mm**. Se aplicó un régimen de **riego deficitario**, bajo la hipótesis de que las plantas cultivadas en sombra requieren menos agua que aquellas expuestas a pleno sol.

La humedad del suelo se midió semanalmente en los primeros 20 cm con el equipo Hydrosens II (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU.). Estas mediciones se realizaron entre las hileras de cultivo dentro de un caballón y arrojaron valores de

humedad entre **5,6 % y 27,1 %**, dependiendo de la cercanía del último riego. No se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos.

2.5. Tratamientos de sombra

El experimento contempló dos tratamientos principales:

1. **Cultivo bajo sombra**: Plantas ubicadas dentro del sistema fotovoltaico, expuestas a sombra parcial durante el día.

2. **Cultivo a cielo abierto**: Plantas situadas fuera del sistema fotovoltaico, con exposición total al sol.

3. Resultados

Este estudio evaluó el impacto del sombreado y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el rendimiento del cultivo de tomate en sistemas agrovoltaicos. Los resultados se presentan en dos partes. La segunda parte aborda el análisis de los parámetros eléctricos, la producción de energía y la fiabilidad de los módulos fotovoltaicos reutilizados en comparación con los nuevos en condiciones reales de funcionamiento.

La primera parte analiza el rendimiento total, la producción comercial de tomate y el desempeño del fruto, considerando el peso seco de la planta y los efectos de la variabilidad de la PAR. Cada sección examina los hallazgos, sus implicaciones y posibles estrategias para optimizar estos sistemas.

El rendimiento total del cultivo, un indicador clave de productividad, no presentó diferencias significativas entre las parcelas con y sin sombra. No obstante, el rendimiento promedio en las parcelas sombreadas fue de 706 g/planta (**46%** de la producción), mientras que en las parcelas sin sombra alcanzó los 822 g/planta **(54%** de la producción) (Figura 4).

El rendimiento total medio, expresado como el peso total de todos los frutos cosechados, sin distinción de madurez, color o estado. Además, el rendimiento total refleja la producción comercializable, es decir, el peso de la fruta apta para la venta.

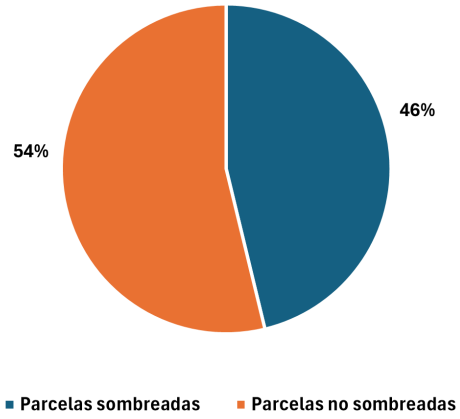


Figura 4. *Producción total de tomates expresada en porcentaje del total cosechado*

Los valores de la integral diaria de luz acumulada fueron consistentemente más bajos en las parcelas sombreadas a lo largo de todo el ciclo de cultivo, alcanzando un total de 3415 mol/m². Esto demuestra que la presencia de paneles fotovoltaicos reduce la incidencia de radiación solar sobre las plantas. En contraste, las parcelas no sombreadas estuvieron expuestas a una mayor radiación, acumulando 5239 mol/m² (

Tabla **1**).

Tabla 1. Integral Diaria de Luz Acumulada (IDLA) expresada en mol/m^2

Integral Diaria de Luz Acumulada (mol/m^2)	
Parcelas sombreadas	3415,5
Parcelas no sombreadas	5239,2

También se incluyen frutos dañados, como aquellos con podredumbre apical (BPR) o afectados por el sol. Esta métrica abarca tanto los frutos completamente maduros como los que aún no han alcanzado su desarrollo final, incluyendo tomates verdes y amarillos.

Nuestro estudio mostró que las plantas cultivadas en parcelas sin sombra tenían, en promedio, un peso seco mayor (65 g/planta ± 10 DE) que aquellas en parcelas con sombra (55 g/planta ± 4 DE). Sin embargo, como se observa en la Figura 4, esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Es posible que esta falta de significancia se deba al tamaño reducido de la muestra, lo que constituye una limitación del estudio. Dado que el peso seco es un indicador clave del crecimiento vegetativo, investigaciones futuras con un mayor número de muestras podrían

arrojar resultados más concluyentes sobre el efecto del sombreado en este parámetro.

La segunda parte del análisis aborda el comportamiento de los módulos fotovoltaicos, comparando el rendimiento de energéticos de paneles nuevos y reutilizados. La Figura 5 presenta la producción de energía (kWh/kWhp) para ambos tipos de módulos, alimentando tres inversores diferentes. Los valores fueron calculados como la relación entre la energía medida mensualmente y la energía pico teórica acumulada, utilizando como referencia la potencia nominal para los módulos nuevos y la potencia medida mediante curva I-V en el simulador solar para los módulos reutilizados.

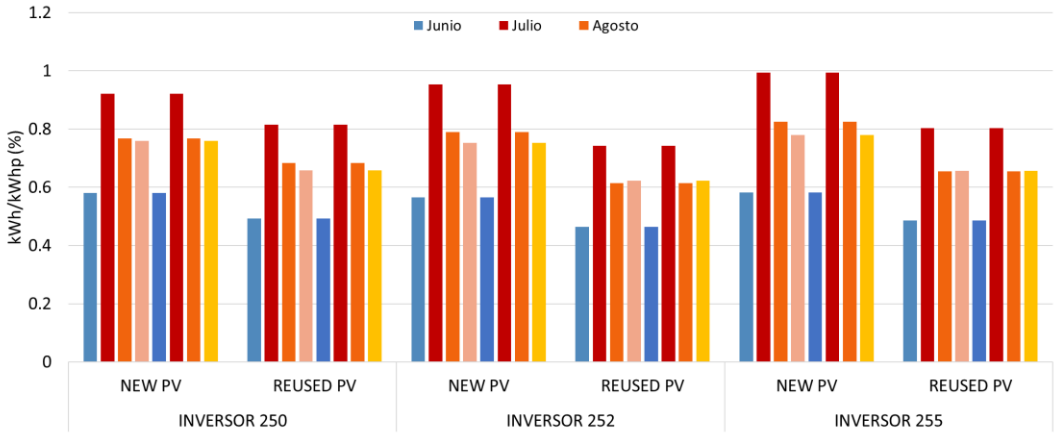


Figura 5 Comparación de producción de energía mensual en kWh/kWhp (%) de paneles fotovoltaicos nuevos y reutilizados en los tres inversores. (Extraído de (Nieto-Morone et al., 2025)[6]).

Se observa que la energía generada en junio es un 24 % inferior en comparación con septiembre para todos los inversores. Esta discrepancia se debe a la ausencia de datos de generación de electricidad durante junio debido a los periodos de mantenimiento de la planta. En cambio, durante los meses restantes, julio y agosto, existe una correlación más directa entre la irradiancia y las variables de producción de energía correspondientes.(Nieto-Morone et al., 2025).

Para evaluar la eficiencia operativa, se utilizó el Performance Ratio (PR) para comparar la operación de los módulos nuevos y reutilizados en condiciones reales.

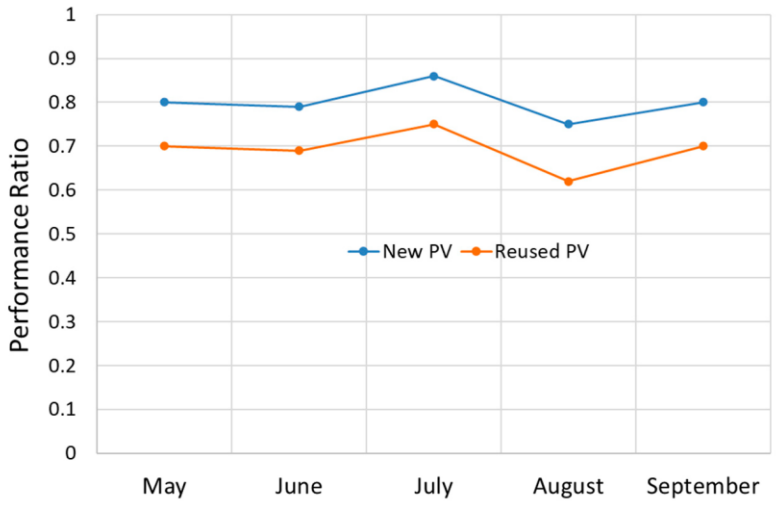


Figura 6 *Evolución del performance ratio de mayo a septiembre. (Extraído de (Nieto-Morone et al., 2025)[6])*

Los resultados presentados en la Figura 3 presentan la evolución diaria del PR de ambos tipos de módulos desde mayo hasta septiembre. El PR de los módulos reutilizados es sistemáticamente inferior, con una diferencia media del 12,3 % respecto a los módulos nuevos. No obstante, ambos conjuntos muestran una tendencia estable en el tiempo, lo cual es especialmente relevante en el caso de los módulos reutilizados, ya que evidencia un comportamiento predecible y fiable. Este resultado respalda su posible reutilización en entornos donde la eficiencia máxima no sea prioritaria, aportando una solución técnica alineada con principios de economía circular.

4. Discusión

En este estudio, se registraron la irradiancia global y la radiación PAR para evaluar su relación con los parámetros eléctricos monitoreados. El rendimiento del sistema fotovoltaico fue analizado mediante el seguimiento de la producción de los paneles, tanto nuevos como reutilizados, y las variables climáticas que pudieran influir en su desempeño.

La irradiancia global incidente sobre los paneles fotovoltaicos fue medida cada 15 minutos durante los meses de mayo a septiembre. En la Figura 7 se presentan los valores de la mediana, los rangos intercuartiles y los valores atípicos. El rango intercuartil (RIC), que es una medida estadística que describe la dispersión de los datos, corresponde al intervalo que abarca el 50% central de la distribución y se calcula como la diferencia entre el tercer y el primer cuartil. Este análisis permite caracterizar la variabilidad estacional de la irradiancia y detectar los picos de radiación mensuales.

5. Conclusions

El estudio analiza la viabilidad operativa de los módulos fotovoltaicos reutilizados dentro de un sistema agrovoltaico. Aunque su rendimiento es algo menor en comparación con los paneles nuevos, mantienen una relación estable entre la irradiancia y la producción energética. Los coeficientes de correlación registrados superaron 0,93 en los meses de mayor irradiación, alcanzando 0,993 en septiembre. Asimismo, el índice de rendimiento (PR) indica que estos módulos presentan un comportamiento predecible, con pérdidas de eficiencia dentro de rangos aceptables. Esto sugiere que los módulos reutilizados pueden ser adecuados para aplicaciones en escenarios con demandas energéticas moderadas, como la agrovoltaica.

Por otro lado, los resultados muestran que la reducción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) no afectó significativamente el rendimiento de los cultivos. Del mismo modo, no se detectaron cambios sustanciales en el consumo de agua, lo que indica que los sistemas agrovoltaicos pueden integrarse con la producción agrícola sin generar impactos negativos en el uso de los recursos hídricos.

La integración de paneles solares reutilizados en sistemas agrovoltaicos puede contribuir a los principios de la economía circular, al extender la vida útil de los módulos fotovoltaicos y reducir la necesidad de fabricar nuevos dispositivos. Esto podría ayudar a disminuir el impacto ambiental y gestionar de manera más eficiente los residuos electrónicos generados por la industria fotovoltaica.

Los hallazgos sugieren que los sistemas agrovoltaicos pueden ofrecer una alternativa para optimizar el uso del suelo mediante la combinación de generación de energía renovable y producción agrícola. La integración de paneles reutilizados podría mejorar la eficiencia energética y reducir la generación de residuos, en línea con los objetivos de sostenibilidad ambiental.

En conclusión, la combinación de sistemas agrovoltaicos con módulos fotovoltaicos reutilizados puede representar una opción a considerar en el contexto de la transición energética sostenible. Además, esta tecnología podría contribuir a abordar algunos de los desafíos asociados con la seguridad alimentaria y el uso eficiente del suelo, ofreciendo beneficios tanto en términos ambientales como económicos.

Contribuciones del autor: Conceptualización, M.d.C.A.-G., M.-Á.M.-G., A.C. y D.P.L.; metodología, M.d.C.A.-G.,A.C. y D.P.L.; validación, M.-Á.M.-G. y M.d.C.A.-G.; análisis formal, M.-B.N.-M., F.G.R. y C.B.-B.; investigación, D.P.L., C.B.-B., A.C. y M.-B.N.-M.; recursos, M.d.C.A.-G. y M.-Á.M.-G.; curación de datos, M.-B.N.-M., F.G.R., C.B.-B. y D.P.L.; redacción—preparación del borrador original, M.-B.N.-M., G.M.-C. y C.B.-B.; Redacción: revisión y edición, M.-B.N.-M., F.G.R., M.-Á.M.-G., D.P.L., G,M.-C. y M.d.C.A.-G.;

visualización, M.-B.N.-M., C.B.-B., G.M.-C. y M.d.C.A.-G.; supervisión, M.d.C.A.-G. y M.-Á.M.-G.; búsqueda de financiación, M.d.C.A.-G. y D.P.L. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Este trabajo cuenta con el apoyo de la subvención **PID2020-118417RB-C21**, financiada por MICIN/AEI/10.13039/501100011033. Este estudio recibió apoyo adicional mediante la subvención **PID2021-1227722OB-I00**, "Producción sostenible de hortalizas basada en sistemas agrivoltaicos", financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y el Fondo Europeo de Desarrollo (FEDER), programa "ERDF A Way of Making Europe". Asimismo, ha recibido soporte de la subvención **PID2023-147841OB-C22** "Use of emerging photovoltaic technologies for booster pumping in hydrants adapted to the crop water requirements and the characteristics of the distribution. (EmerPVpump)".

Declaración de disponibilidad de datos: Datos disponbiles a petición.

Reconocimientos: In this section, you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Conflicto de Intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Guan, J.; Sun, J.; Shi, X.; Wei, J. Review of full-spectrum solar energy systems based on spectral splitting technology. *Int. J. Hydrogen Energy* **2024**, *81*, 1235–1255.
2. Bruhwyler, R.; Sánchez, H.; Meza, C.; Lebeau, F.; Brunet, P.; Dabadie, G.; Dittmann, S.; Gottschalg, R.; Negroni, J.J. Vertical agrivoltaics and its potential for electricity production and agricultural water demand: A case study in the area of Chanco, Chile. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2023**, *60*, 103425.
3. Feuerbacher, A.; Herrmann, T.; Neuenfeldt, S.; Laub, M.; Gocht, A. Estimating the economics and adoption potential of agrivoltaics in Germany using a farm-level bottom-up approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *168*, 112784.
4. Ferrara, G.; Boselli, M.; Palasciano, M.; Mazzeo, A. Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.). *Sci. Hortic.* **2023**, *308*, 111595.
5. Kadowaki, M.; Yano, A.; Ishizu, F.; Tanaka, T.; Noda, S. Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth. *Biosyst. Eng.* **2012**, *111*, 290–297.
6. Nieto-Morone, M.-B., Muñoz-García, M.-Á., Pérez López, D., Bernal-Basurco, C., García Rosillo, F., & Alonso-García, M. del C. (2025). Agrivoltaics: Integration of Reused PV Modules. Agronomy, 15(3), 730. https://doi.org/10.3390/agronomy15030730

PARTE 13

INOVAÇÃO EDUCACIONAL

INNOVACIÓN EDUCATIVA

Índice

Comparación de tres proyectos de Aprendizaje/Servicio en la mejora de la formación de los alumnos 1395

Framework educativo para Agricultura de Precisión: Uso de IoT en entornos universitarios 1405

DESIGN THINKING COMO MÉTODO PARA GERAÇÃO DE TECNOLOGIAS EM COMUNIDADE RURAL 1415

SOFT SKILLS E TECNOLOGIAS COMO TEMAS RELEVANTES NA FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO AGRÔNOMO 1430

La irrupción de la IA en la docencia: necesidades de los egresados, metodologías docentes y de evaluación en Ingeniería Agroforestal 1446

Recuperando la Historia Agrícola a Través del Arte: Un Proyecto de Innovación Docente 1456

Proyecto de aprendizaje-servicio en Ingeniería Agraria 1463

Estrategias de mejora en las enseñanzas de ingeniería mediante la aplicación de la metodología de Aproximación al Mundo Laboral (AML) 1472

Comparación de tres proyectos de Aprendizaje/Servicio en la mejora de la formación de los alumnos

Ana García-Serrano[1], Ricardo Páramo[1], Andrés Almeida[1], Iván Herranz[1], Fernando R. Mazarrón[1], Alicia Perdigones[1,*]

1 Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Agroforestal; ana.gserrano@upm.es; r.paramo@upm.es; af.almeida@upm.es; ivan.herranz@hotmail.com; f.ruiz@upm.es; alicia.perdigones@upm.es

* Correspondencia: alicia.perdigones@upm.es

Abstract: La Universidad Politécnica de Madrid concedió, en una convocatoria interna, tres proyectos ApS a la unidad docente de Electrotecnia de la ETSI Agronómica, lo que ha permitido comparar metodologías y resultados. Se han desarrollado tecnologías para prácticas (por ejemplo, ovoscopios para evaluar con LEDs la calidad del huevo), nuevos temas para TFGs y TFMs, y recursos docentes para los siguientes cursos (por ejemplo, una visita estructurada a un huerto urbano). Resulta clave tener una buena conexión en la institución donde se realiza el proyecto ApS. Los proyectos ApS en Institutos de Enseñanza Secundaria han generado líneas de trabajo para realizar TFGs y TFMs en condiciones más reales; y el proyecto ApS en un huerto urbano permite a los alumnos de los grados de Ingeniería Agrícola y Agroambiental conocer los problemas prácticos que tienen los usuarios de tecnologías agrícolas.

Keywords: Aprendizaje-servicio; docencia universitaria; competencias transversales

1. Introducción

El aprendizaje-servicio (ApS) es una propuesta educativa que combina procesos de aprendizaje y de servicio a una comunidad, en un solo proyecto, en el cual los alumnos se forman al implicarse en necesidades reales del entorno de la comunidad, con la finalidad de mejorarla. Martínez-Usarralde et al. (2024) examinaron la implementación del ApS entre 2019 y 2023 en universidades europeas. A través de una revisión sistemática, se analizó cómo la combinación del ApS con tecnologías de la información y comunicación impacta en las competencias del alumnado. Los resultados indicaron que, aunque los estudiantes prefieren la modalidad presencial, el ApS digital contribuye positivamente al desarrollo de competencias cívicas, digitales, sociales, motivacionales, laborales y didácticas. Además, se destacó que la digitalización en las aulas actúa como un instrumento clave para la innovación futura en esta metodología.

Amiano et al. (2023) y García-Gutierrez et al. (2023) realizaron una revisión de artículos y proyectos de ApS en Europa y América Latina relacionados con la Agenda 2030, y demostraron que el ApS no solo potencia la formación académica, sino que también promueve la colaboración entre agentes educativos y sociales. Se concluyó que el ApS es una herramienta eficaz para que las universidades contribuyan activamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), integrando la responsabilidad social universitaria en sus funciones docentes y formativas.

Redondo-Corcobado et al. (2020) y Vila & Álvarez (2024) revisaron, respectivamente, las interacciones del ApS con la producción científica y las tesis doctorales.

Bonastre et al. (2021) utilizaron la metodología del meta-análisis para evaluar el ApS. Los resultados indicaron que el ApS mejora significativamente la adquisición de conocimientos y, en menor medida, la actitud hacia el servicio. Se concluyó que el ApS beneficia a los estudiantes, pero que se requiere una mejora en los diseños de investigación para comprender plenamente sus efectos.

La unidad docente de Electrotecnia, de la ETSI Agronómica de Madrid, propuso para el año 2025 tres proyectos ApS que fueron concedidos por la universidad (Universidad Politécnica de Madrid). El desarrollo de los tres proyectos permitió comparar metodologías y resultados, y obtener conclusiones sobre las mejores opciones para la formación de los alumnos con este tipo de proyectos.

2. Proyecto 1. “Placas solares para dar servicio al jardín vertical automatizado”

Este proyecto se realiza para dar servicio al Instituto de Enseñanza Secundaria (IES) “Francisco Tomás y Valiente”. En este proyecto participan 4 profesores de dos departamentos de la ETSI Agronómica y la ETS de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Se espera formar a unos 50 alumnos de la UPM en los temas del diseño de instalaciones fotovoltaicas para dar servicio a un jardín vertical automatizado, dando formación también en el proceso a unos 100 alumnos del Instituto. Se han llevado a cabo las siguientes actividades:

- Actividad 1. Presentaciones: propuesta, actores, espacios e infraestructuras (marzo de 2025). Se realizó una visita de profesores y alumnos UPM al centro educativo que recibe el servicio. Los objetivos fueron presentar la propuesta de uso de las placas solares a alumnos de Grado Medio en Instalaciones Eléctricas del I.E.S. Francisco Tomás y Valiente, para que puedan ser utilizadas por el Grado Superior en Automatización y Robótica Industrial de dicho

Instituto, midiendo la cantidad de agua de riego, temperatura, humedad y kW del sistema con paneles fotovoltaicos.

- Actividad 2. Está en marcha la instalación de la estructura para albergar las placas solares (marzo de 2025), actividad que están realizando alumnos y profesores UPM con alumnos y profesores del I.E.S. Francisco Tomás y Valiente. Está aprobado e iniciado un TFM en el cual una alumna UPM, asesorada por profesores del proyecto, está diseñando el sistema completo del jardín vertical automatizado.

Las siguientes actividades están previstas en el proyecto:

- Actividad 3. Preparación de una práctica de electricidad para poder medir la cantidad de agua de riego, temperatura, humedad y kW del sistema con paneles fotovoltaicos (abril de 2025), práctica en la cual los alumnos aprenderán a automatizar este proceso.
- Actividad 4. Selección de especies vegetales que albergará el jardín vertical y diseño del sistema de riego (mayo de 2025).
- Actividad 5. Los alumnos y profesores de la ETSIAAB impartirán a los alumnos del I.E.S. Francisco Tomás y Valiente conocimientos teóricos y prácticos más amplios sobre automatización aplicados a un jardín vertical.
- Actividad 6. Seguimiento de las prácticas del I.E.S Francisco Tomás y Valiente y recogida de datos del estudio (mayo-septiembre de 2025). Recogida de datos: elaboración de tablas en un sistema informático, recogida sucesiva de imágenes del proceso de montaje de placas solares, automatización y montaje del jardín vertical, y elaboración de informes técnicos que serán examinados por profesores de la ETSIAAB. Fotografías tomadas con móvil para estudio de casos.
- Actividad 7. Muestra fotográfica (octubre de 2025). Exposición fotográfica para dar a conocer el proyecto de ApS de la Universidad Politécnica de Madrid con el I.E.S. Francisco Tomás y Valiente mediante una cronología de imágenes.

Figura 1. Presentación de la propuesta de uso de placas solares en un jardín vertical automatizado a alumnos de Grado Medio en Instalaciones Eléctricas del I.E.S. Francisco Tomás y Valiente, para que puedan ser utilizadas en dicho Instituto.

3. Proyecto 2. "La calidad del huevo en el punto de mira con luz LED"

Este proyecto se realiza para dar servicio al IES "Salvador Allende". En este proyecto participan 5 profesores de tres departamentos de la ETSI Agronómica y la ETS de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Se espera formar a unos 50 alumnos de la UPM en los temas del diseño de ovoscopios para la verificación de la calidad del huevo, dando formación también en el proceso a unos 100 alumnos del Instituto. Se han realizado las siguientes actividades:

- Actividad 1. Presentaciones: propuesta, actores, espacios e infraestructuras (marzo de 2025). Se realizó una visita de profesores y alumnos UPM al centro educativo que recibe el servicio. El objetivo fue presentar la propuesta de uso de luz LED para la elaboración de un ovoscopio, que pueda ser llevado a cabo por alumnos de Grado Medio en Instalaciones Eléctricas del I.E.S. Salvador Allende y que pueda ser utilizado por el Grado Superior en Alimentación y Dietética de dicho Instituto para medir la calidad del huevo mediante la luz LED. Participaron profesores UPM con profesores y alumnos del I.E.S. Salvador Allende.
- Actividad 2. Puesta en marcha del ovoscopio (marzo de 2025), conexiones eléctricas y manejo de la terminología propia de la tecnología eléctrica. Participantes: profesores y alumnos UPM con profesores y alumnos del I.E.S. Salvador Allende.

Figura 2. Presentación de la propuesta de uso de luz LED para la elaboración de ovoscopios, que puedan ser llevados a cabo por alumnos de Grado Medio en Instalaciones Eléctricas del I.E.S. Salvador Allende, para ser utilizados en dicho Instituto.

Figura 3. Uno de los ovoscopios realizados en el proyecto.

Las siguientes actividades están previstas en el proyecto:

- Actividad 3. Preparación de una práctica de electricidad para poder realizar un ovoscopio (abril de 2025) donde los alumnos aprenderán conceptos como espectro de luz, intensidad de iluminación, flujo luminoso, luminancia, ventajas de los usos de LED en granjas de gallinas, uso de luces LED específicas, generales y estándares en avicultura, y construcción de un ovoscopio que después podrán utilizar.
- Actividad 4. Selección de los mejores ovoscopios (mayo de 2025) y entrega a los alumnos de grado superior de alimentación y dietética del I.E.S.

Salvador Allende para que los puedan utilizar en la práctica que realizan de calidad del huevo.

- Actividad 5. Los alumnos y profesores de ETSIAAB impartirán a los alumnos del I.E.S. Salvador Allende unos conocimientos teóricos y prácticos más amplios sobre los ensayos que se realizan sobre la calidad del huevo en la Universidad Politécnica de Madrid.
- Actividad 6. Seguimiento de las prácticas del I.E.S Salvador Allende y recogida de datos del estudio de la calidad del huevo mediante ovoscopios (mayo-septiembre de 2025). Recogida de datos: elaboración de tablas en un sistema informático, recogida sucesiva de imágenes de análisis del huevo y elaboración de informes técnicos que serán examinados por profesores de la ETSIAAB. Fotografías tomadas con móvil para estudio de casos.
- Actividad 7. Muestra fotográfica (octubre de 2025). Exposición fotográfica para dar a conocer el proyecto de Aprendizaje-Servicio de la Universidad Politécnica de Madrid con el I.E.S. Salvador Allende mediante una cronología de imágenes.
- Actividad 8. Elaboración y recogida de datos sobre la calidad del huevo (octubre de 2025) analizada por los alumnos del módulo de grado superior en alimentación y dietética, y procesamiento de datos por parte de los alumnos de la UPM para la obtención de conclusiones de dicho segundo aspecto.

4. Proyecto 3. “Aprendizaje/servicio en huertos urbanos”

Este proyecto se realiza para dar servicio a la asociación vecinal “Tómatelo con calma”, que gestiona un huerto urbano en la zona de Chamartín (Madrid). En este proyecto participan 24 profesores de cuatro departamentos de la ETSI Agronómica de Madrid. Se espera formar a unos 100 alumnos en los temas de huertos urbanos, dando servicio a los aproximadamente 100 usuarios del huerto urbano.

Se han realizado las siguientes actividades:

- Actividad 1. Presentaciones: propuesta, actores, espacios e infraestructuras (febrero de 2025). Ya se realizó una visita de profesores y alumnos UPM al huerto urbano que recibe el servicio.

Las siguientes actividades están previstas en el proyecto:

- Actividad 2. Formación de alumnos UPM en la temática de los huertos urbanos. Se realizarán seminarios y talleres en los grados “Ingeniería Agrícola” e “Ingeniería Agroambiental” y en los Másteres Universitarios en “Ingeniería Agronómica” y “Jardinería y Paisajismo”. Las asignaturas implicadas son “Maquinaria para hortofruticultura y jardinería”, “Electrificación de áreas verdes y explotaciones hortofrutícolas”, “Instalaciones eléctricas y de iluminación”, “Energías renovables”, “Instalaciones de suministro de energía y automatización” y “Programas informáticos en proyectos de ingeniería”.

Se espera mejorar las habilidades del alumnado en competencias clave:

- Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de ingeniería del medio rural: hidráulica, motores y máquinas, electrotecnia, proyectos técnicos.
- Capacidad para conocer, comprender y utilizar las bases de la producción vegetal, los sistemas de producción, de protección y de explotación.
- Respeto al medio ambiente: capacidad para ofrecer soluciones compatibles con la conservación del entorno de forma responsable y sostenible, en el ámbito medioambiental.
- Trabajo en equipo y habilidades en las relaciones interpersonales.

- Actividad 3. Alumnos y profesores de la ETSI Agronómica acudirán al huerto urbano gestionado por la asociación "Tómatelo con calma" para colaborar en las tareas habituales del huerto e impartir seminarios.
- Actividad 4. Se intercambiará información entre los miembros de la asociación "Tómatelo con calma" que gestionan el huerto urbano y los alumnos y profesores del proyecto, sobre el manejo práctico y el día a día de un huerto urbano, lo que contribuirá a la formación práctica y en competencias transversales de los alumnos.

Figura 4. Visita de profesores y alumnos de tercer curso del grado de Ingeniería Agrícola al huerto urbano que recibe el servicio. Esta visita ha quedado estructurada como un recurso docente y se puede repetir en los siguientes cursos.

En este proyecto ya se ha realizado una encuesta, respecto a una visita al huerto urbano. A la visita asistieron 16 alumnos de tercer curso del grado de Ingeniería agrícola. Realizaron una encuesta sobre la visita 13 alumnos, con las siguientes calificaciones (sobre 10 puntos):

- Contenido sobre organización e infraestructuras: 8.7
- Contenido sobre maquinaria: 6.9
- Contenido sobre utilidad y servicios: 8.4
- Nota global: 8.4

No se pudo realizar un pase de motoazada en la visita, y los alumnos lo reclamaron para la siguiente ocasión. Sí está previsto realizar una demostración con la motoazada del huerto en el futuro.

5. Comparación entre los proyectos de Aprendizaje-Servicio

En el proyecto se ha trabajado con dos entornos de aprendizaje-servicio: institutos de enseñanza secundaria y un huerto urbano. Se han podido verificar las ventajas e inconvenientes de trabajar con cada uno de estos entornos.

Los institutos de enseñanza secundaria presentan la ventaja de poder aprovechar los paralelismos entre centros de docencia. La organización y calendarios son similares a los de la universidad. También puede ser más fácil evaluar los resultados del proyecto, ya que los entornos escolares suelen estar acostumbrados a procesos de evaluación y recogida de datos. Sin embargo, es complicado llevar a los institutos grupos grandes de alumnos de universidad, y no tiene demasiadas ventajas formativas. El formato parece más adecuado para llevar alumnos de universidad seleccionados (por ejemplo, alumnos de máster), que impartan sesiones formativas en el instituto o aborden iniciativas de mejora en el instituto. También ha resultado un marco muy oportuno para realizar TFGs o TFMs, partiendo de situaciones reales, para realizar mejoras de infraestructuras, o mejoras relacionadas con la docencia, en los institutos.

Una ventaja singular de colaborar con un instituto de enseñanza secundaria es el potencial impacto educativo. Los estudiantes universitarios pueden actuar como mentores y modelos a seguir para adolescentes, lo que enriquece tanto el aprendizaje de los universitarios como el de los alumnos del instituto. Además, se fomenta la vocación científica o agronómica en etapas tempranas, lo que puede tener un efecto multiplicador en la orientación futura de los estudiantes de secundaria.

En comparación, realizar un proyecto de ApS en un huerto urbano ofrece una conexión directa con el entorno físico y social, lo cual es especialmente relevante en el ámbito de la ingeniería agronómica. Los estudiantes universitarios pueden aplicar de forma práctica sus conocimientos sobre agricultura, sostenibilidad y gestión ambiental, contribuyendo a la mejora del huerto urbano.

Además, el contacto con el huerto urbano suele implicar colaboración intergeneracional y comunitaria; los alumnos hablan con usuarios del huerto de muy diferentes edades y formación agrícola, lo que enriquece la experiencia de los estudiantes al ponerlos en contacto con diversas realidades y promover habilidades transversales como la comunicación y la resolución de problemas prácticos.

Una ventaja es que se puede acceder al huerto urbano con grupos más numerosos de alumnos (respecto a la situación equivalente en institutos), sin particulares problemas. Se pueden impartir en el huerto sesiones prácticas a grupos de hasta 30 alumnos, con resultados positivos.

No obstante, este tipo de proyectos puede presentar desafíos logísticos, como la coordinación con los usuarios del huerto urbano. Además, los resultados del proyecto pueden ser más difíciles de evaluar de manera sistemática; por ejemplo, ha resultado complicado realizar encuestas a un número significativo de usuarios del huerto urbano.

6. Conclusiones

Los proyectos, en la fecha de la presentación de este estudio, están en pleno desarrollo. Ya se han realizado un número importante de actividades y se han obtenido conclusiones:

* Ya se han construido tres ovoscopios, y está establecida la metodología para crear más ovoscopios. Se trata de una tecnología que permite relacionar distintos temas de aplicación (electrotecnia, electrónica, parámetros de iluminación, producción animal), por lo que son un interesante recurso formativo para ingenieros agrícolas e ingenieros alimentarios.

* Todos los proyectos ApS han funcionado correctamente y han proporcionado una formación alternativa interesante al colocar a los alumnos en situaciones distintas de las situaciones convencionales del aula. Parece claro que es necesario tener una buena conexión en la institución donde se realiza el proyecto ApS; por ejemplo, los profesores contactados en los institutos han estado extraordinariamente receptivos y su contribución ha sido clave.

* El proyecto ApS en el huerto urbano, para los grados de Ingeniería Agrícola y Agroambiental, presenta la ventaja de que los alumnos ven instalaciones distintas de las que ven en la docencia convencional (sistemas de riego por goteo, cultivos) en una instalación real, que normalmente es diferente de las instalaciones de prácticas universitarias, con la ventaja adicional de que los usuarios de la instalación les describen su experiencia práctica (y sus problemas) con las tecnologías.

* En general los tres proyectos ApS han proporcionado recursos valiosos, que se pueden utilizar de forma continuada en los siguientes cursos. La primera encuesta realizada, en el proyecto sobre huertos urbanos, obtuvo una calificación global de 8.4 sobre 10.

Referencias

1. Amiano, I.; Gezuraga-Amundarain, M.; Alonso-Sáez, I.. Aprendizaje-Servicio como instrumento para incorporar la Agenda 2030 en las universidades. Revista Iberoamericana de Educación Superior 2023, 15(43).
2. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-28722024000200181
3. Bonastre, C.; Camilli, C.; García-Gil, D.; Cuervo, L. Implicaciones educativas y sociales del Aprendizaje-Servicio con métodos mixtos a través de un meta-análisis. Revista Española de Pedagogía 2021, 79(279), 269-287.
4. https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/13065/6%20REP%20279_ESP%20Bonastre.pdf?sequence=1
5. García-Gutiérrez, J.; Amador Morera, F. J.; Cano Ramírez, A. El aprendizaje-Servicio universitario ante los retos de la Agenda 2030. Editorial UNED 2023.
6. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/715175/9779284.pdf?sequence=1
7. Martínez-Usarralde, M.J.; Tarazona Gil, C.; Carbonell Marqués, Á. Revisión sistemática del Aprendizaje-Servicio digital en instituciones de educación superior en Europa. Revista mexicana de investigación educativa 2024, 29(103), 801-827.
8. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9729419
9. Redondo-Corcobado, P.; Fuentes Gómez-Calcerrada, J. L. La investigación sobre el Aprendizaje-Servicio en la producción científica española: una revisión sistemática. Revista Complutense de Educación 2020.
10. https://docta.ucm.es/entities/publication/c7bfb831-745a-4240-96ee-5eb88e2539c9/full
11. Vila Merino, E. S.; Álvarez Jiménez, V. E. La investigación sobre el Aprendizaje-Servicio a través de las tesis doctorales. Aula de Encuentro 2024, 26(2).
12. https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ADE/article/view/8753

Framework educativo para Agricultura de Precisión: Uso de IoT en entornos universitarios

José Álvarez[1], Alejandro Leo-Ramírez[2], Carlos Gilarranz-Casado[1], Jorge Cervera-Gascó[3], Constantino Valero[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), Ingeniería Agroforestal, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España; jose.alvarez.sanchez (J.A); carlosandres.gilarranz@upm.es (C. G-C); constantino.valero@upm.es (C. V).

[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos (ETSISI), Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid, España; alejandro.leo.ramirez@upm.es (A.L.-R.).

[3] Producción Vegetal y Tecnología Agraria, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes y Biotecnología, 02006 Albacete, España; jorge.cervera@uclm.es (JC-G).

* Correspondence: jose.alvarez.sanchez@upm.es

Abstract: El Internet de las Cosas (IoT) está revolucionando la agricultura al mejorar la eficiencia en la gestión de cultivos mediante sensores y actuadores inteligentes. Estas tecnologías facilitan la recopilación de datos en tiempo real y optimiza el uso de recursos. A pesar de su impacto en el sector, su integración en la formación universitaria de disciplinas agrarias y alimentarias sigue siendo limitada, dificultando la adquisición de competencias clave en digitalización agrícola. Este trabajo presenta un *framework* educativo para la enseñanza de esta tecnología en un entorno universitario. Como caso de uso práctico de este *framework*, se impartió una parte del temario en el que se incorporó el uso de sensores próximos y actuadores controlados por IoT. Su implementación se desarrolló en el máster de Agricultura de Precisión de la Universidad Politécnica de Madrid, dentro de la asignatura Sensores Próximos para el Seguimiento de Cultivos, con el objeto de ofrecer a los estudiantes experiencia directa en el uso de esta tecnología aplicada al monitoreo agrícola. Para ello, se utilizaron microcontroladores como Arduino y ESP32, junto con sensórica aplicada y actuadores para la automatización de procesos. Dado el éxito del IoT en la educación en otros ámbitos, este enfoque buscó reducir la brecha entre la formación académica y las necesidades tecnológicas del sector. Además, este *framework* sirve como base para la investigación en docencia aplicada a la agricultura de precisión. Al finalizar el período de docencia, se realizó una encuesta a los estudiantes, cuyos resultados mostraron un alto impacto en el aprendizaje, consolidando la efectividad del experimento. Los resultados obtenidos son positivos, alineados con experiencias previas en la integración de tecnologías avanzadas en entornos educativos. Esta propuesta representa una contribución innovadora a la enseñanza de la agricultura, transformando un enfoque tradicional en un modelo más tecnológico y aplicado, orientado a la formación de profesionales capacitados para afrontar los retos del sector.

Keywords: Internet de las cosas, agricultura de precisión, educación en IoT, sensores proximales, competencias digitales, innovación educativa.

1. Introducción

En los últimos años, la agricultura ha experimentado una transformación significativa debido a la incorporación de tecnologías avanzadas, entre ellas el Internet de las Cosas (IoT). La integración de dispositivos inteligentes ha permitido optimizar el uso de recursos mejorando la eficiencia en la producción agrícola y contribuyendo a la sostenibilidad del sector [1, 2]. Sin embargo, a pesar de estos avances, la adopción de IoT en el ámbito educativo agronómico sigue siendo baja, lo que dificulta la formación de profesionales con habilidades y competencias digitales adecuadas para enfrentar los desafíos de la agricultura de precisión [3].

El IoT no solo facilita la recopilación de datos en tiempo real, sino que también permite la aplicación de inteligencia artificial y *big data* para mejorar la toma de decisiones agronómicas [4]. A pesar del creciente interés en esta tecnología, su implementación en planes de estudio universitarios sigue siendo escasa. Existen aún pocos estudios que abordan el uso de IoT en distintos ámbitos educativos. Sin embargo, algunos investigadores han destacado el potencial del IoT en la educación, desde la programación hasta la concienciación ambiental [5][6]. Aun así, se observa la falta de *frameworks* educativos diseñados específicamente para enseñar nuevas tecnologías en el contexto de la agricultura de precisión.

Ante esta problemática, el presente estudio propone el diseño e implementación de un *framework* educativo que integre la enseñanza de estas nuevas tecnologías en entornos universitarios. Este enfoque tiene como objeto proporcionar a los estudiantes experiencia práctica en el uso de estas tecnologías digitales aplicadas a la agricultura, promoviendo la interdisciplinariedad entre distintas áreas de la ingeniería. Además, se espera que este *framework* pueda servir como referencia para futuras implementaciones educativas tecnológicas en otros contextos académicos.

2. Materiales y métodos

Entorno educativo y población de estudio

El *framework* educativo propuesto se implementó en una asignatura de un máster universitario de formación en agricultura de precisión, dirigido a estudiantes en áreas relacionadas con la agronomía y la ingeniería. El objeto del curso fue dotar a los estudiantes de competencias digitales y habilidades IoT aplicadas a la agricultura mediante el uso de tecnologías IoT. Las clases se llevaron a cabo en un aula de prácticas equipado con estaciones de trabajo en equipo, conexión a Internet y entornos de desarrollo de *hardware* y *software*.

El experimento fue diseñado para un grupo de 16 estudiantes, organizados en equipos de trabajo colaborativo. La diversidad de perfiles académicos permitió evaluar la aplicabilidad del *framework* en distintos niveles de formación y disciplinas afines. Los alumnos provenían de distintas titulaciones de Grado: Ingeniería Agrícola, Ingeniería Alimentaria, Ingeniería Agroambiental y de Ciencias Agrarias y Bioeconomía, y, de distintos países, en su mayoría, de España, y en menor medida, de Latinoamérica, lo que aportó un enfoque interdisciplinario y enriqueció el aprendizaje.

Materiales y equipamiento

Para la implementación del *framework*, se utilizaron los siguientes componentes tecnológicos:

- Microcontroladores: Arduino Uno y ESP32, empleados para la recopilación y procesamiento de datos. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en proyectos IoT debido a su flexibilidad, bajo coste y facilidad de uso [7].
- Sensores proximales: sensores de humedad del suelo, temperatura, humedad ambiental y radiación solar, etc. Estos sensores son fundamentales en la agricultura de precisión para monitorear condiciones ambientales y optimizar el rendimiento de los cultivos [8].
- Actuadores: relés, servomotores y ventiladores para la automatización de necesidades agronómicas. La automatización permite mejorar la eficiencia en el uso de recursos y reducir costos operativos [9].
- Entornos de desarrollo y visualización:
    - Arduino IDE: Se trata de un entorno de desarrollo que permite la programación de los microcontroladores. Esta plataforma es popular por su facilidad de uso y amplia comunidad de desarrolladores [10].
    - Thingsboard: Se trata de una plataforma en la nube utilizada para la monitorización remota de datos agrícolas. Permite la visualización y análisis de datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas [11].
    - Moodle: Se trata de una herramienta educativa ampliamente utilizada para la gestión de cursos en línea [12]. Utilizado para la gestión de contenidos, documentos y seguimiento de las actividades del curso.
- Infraestructura de red: Conectividad WiFi para la integración de los dispositivos con la nube.

Diseño del curso y metodología de enseñanza

El curso se estructuró en cinco módulos progresivos, combinando sesiones teóricas y prácticas:

1. Introducción a la electrónica y microcontroladores – Explicación de conceptos básicos de Arduino y ESP32.
2. Uso de sensores en agricultura – Instalación y calibración de sensores agronómicos.

3. Automatización con actuadores IoT – Implementación de controladores para sistemas de riego y ventilación en condiciones de invernadero.
4. Conectividad y monitoreo en la nube – Uso de Thingsboard o Arduino IDE para la visualización remota de datos.
5. Transformación de datos y toma de decisiones – Aplicación de modelos para interpretar variables agronómicas.

Cada módulo incluyó actividades prácticas donde los estudiantes configuraron sensores y actuadores en un entorno realista y controlado. Los participantes documentaron su proceso a través de informes de entrega hasta la entrega final del proyecto completo, fomentando el aprendizaje basado en proyectos.

Recolección y análisis de datos

Al finalizar el curso, con el objetivo de evaluar la efectividad de este *framework*, los alumnos completaron una encuesta global elaborada por los autores de este artículo, centrada en la opinión sobre la adquisición de competencias digitales. El cuestionario incluyó preguntas en escala Likert (1-5) [13], incluyendo aleatoriamente preguntas en gramática negativa para evitar sesgos en las respuestas.

Los datos recopilados fueron analizados mediante estadísticas descriptivas para identificar el grado de adquisición de competencias. Además, se realizaron observaciones directas durante las sesiones para complementar el análisis cuantitativo con evidencia cualitativa [14].

3. Resultados y discusión.

Resultados obtenidos sobre el nivel de adquisición de competencias

La población encuestada estuvo compuesta por 16 estudiantes de posgrado matriculados en el máster, con un perfil del alumnado es heterogéneo en cuanto a formación previa, incluyendo estudiantes provenientes de áreas como ingeniería agronómica, ciencias ambientales y disciplinas afines, con diversos niveles de experiencia en programación, electrónica y uso de tecnologías digitales.

Antes del inicio del máster, la mayoría de los participantes no había trabajado previamente con plataformas como Arduino, ESP32 o sistemas IoT, mostrando niveles de familiaridad inicial bajos a moderados (media = 2,00 en familiaridad con IoT; media = 1,69 en programación).

A lo largo del curso, se evaluaron las percepciones del alumnado sobre la adquisición de competencias técnicas mediante un cuestionario estructurado de 17 ítems, utilizando principalmente escalas tipo Likert de 1 a 5 para medir familiaridad, competencia y confianza en distintos aspectos técnicos.

Los resultados reflejan tendencias importantes sobre el impacto del framework educativo en la adquisición de competencias digitales en agricultura de precisión:

- Entre las competencias adquiridas, destaca la fuerte correlación positiva entre el nivel de competencia percibido en el uso de placas Arduino y ESP32 y la competencia en el diseño de prototipos funcionales que integran sensores y actuadores. El coeficiente de Spearman calculado entre ambas variables fue de $\rho = 0,73$, lo que indica que los estudiantes que se sienten más seguros utilizando las placas también tienden a sentirse más competentes a la hora de crear soluciones integradas y operativas.
  Este resultado evidencia que la destreza técnica en el uso de hardware constituye una base sólida para el desarrollo de sistemas IoT agronómicos, y refuerza la importancia de incorporar prácticas formativas basadas en la creación y validación de prototipos en el aula.
- Asimismo, se observa una correlación positiva significativa entre la confianza en la resolución de problemas básicos en circuitos electrónicos y la seguridad en la configuración de sistemas con plataformas IoT como ThingsBoard o Arduino IDE.
  El coeficiente de Spearman obtenido fue de $\rho = 0,60$, lo que sugiere que una buena base en la resolución de incidencias técnicas contribuye a una mayor seguridad al abordar herramientas digitales más avanzadas para la gestión de datos en la nube.
  Este hallazgo pone de manifiesto la necesidad de articular progresivamente las competencias técnicas básicas con las digitales, de modo que el alumnado se sienta preparado no solo para implementar soluciones físicas, sino también para operar entornos digitales completos en el contexto de la digitalización agrícola.
- Se analizó la evolución percibida por el alumnado desde su familiaridad inicial con tecnologías IoT hasta su confianza actual en la resolución de problemas técnicos avanzados. En una escala de 1 (nada familiarizado/confianza nula) a 5 (completamente familiarizado/confianza total), la media inicial fue de 2,00 (DE = 0,63), mientras que la confianza actual alcanzó un valor de 3,25 (DE = 0,77). Esta diferencia fue estadísticamente significativa en todas las pruebas aplicadas: Wilcoxon ($p = 0,0011$) y t de Student ($p < 0,0001$). El 81,25% del alumnado declaró sentirse más seguro ahora que al inicio. Además, el análisis factorial reveló una dimensión técnica común entre ambas variables, explicando el 80% de la varianza.
  Estos resultados permiten concluir que el framework educativo implementado ha sido eficaz no solo para introducir al alumnado en nuevas tecnologías, sino también para incrementar de forma significativa su confianza en la resolución de problemas técnicos complejos, lo que constituye un indicador relevante de adquisición de competencias en el contexto de la Agricultura de Precisión y la digitalización agronómica.
- El análisis de la confianza percibida en distintas competencias técnicas reveló una diferencia significativa entre la capacidad para resolver problemas básicos en circuitos electrónicos y la confianza en el uso de plataformas IoT. La media de confianza en la resolución de problemas básicos fue de 3,56 (DE = 0,89), mientras que la confianza en la configuración de plataformas como

ThingsBoard o Arduino IDE obtuvo una media de 3,00 (DE = 0,82). La prueba de Wilcoxon para muestras pareadas confirmó que esta diferencia es estadísticamente significativa (p = 0,028), lo que indica una menor percepción de competencia en el uso de sistemas de visualización y gestión de datos en la nube.

Estos resultados evidencian una brecha formativa entre las competencias técnicas básicas adquiridas por el alumnado y aquellas vinculadas al uso de herramientas digitales avanzadas como ThingsBoard o Arduino IDE. Aunque ambas competencias forman parte del ecosistema IoT aplicado a la Agricultura de Precisión, la diferencia significativa sugiere que los estudiantes desarrollan primero habilidades prácticas relacionadas con la electrónica básica, mientras que las herramientas de gestión de datos en la nube requieren una integración más profunda en el proceso formativo.

En base a estos resultados, cabría esperar un aumento del tiempo formativo y práctico dedicado específicamente a la configuración, uso y contextualización de plataformas IoT como ThingsBoard o Arduino IDE, de modo que el alumnado pueda consolidar su confianza en estas tecnologías y adquirir un mayor grado de competencia en esta área. Esta mejora contribuiría directamente a una formación más equilibrada, favoreciendo la transición del estudiante desde la experimentación física hasta la gestión inteligente de datos, aspecto clave en los procesos de digitalización agrícola.

Esta diferencia sugiere que, si bien los estudiantes han desarrollado habilidades técnicas fundamentales, aún existe una brecha en la adopción de plataformas IoT para la gestión de datos en la nube, lo que justifica la necesidad de mayor integración y profundización en este tipo de herramientas dentro del marco formativo.

En conjunto, estos hallazgos destacan que el framework educativo ha permitido fortalecer la formación técnica de los estudiantes.

Beneficios del uso de IoT en la educación en agronomía

El avance tecnológico en el sector agrario y alimentario ha impulsado la adopción del Internet de las Cosas (IoT) como una herramienta clave para la optimización de procesos agrícolas. Diversos estudios han demostrado que la implementación de sensores y sistemas de automatización en la agricultura mejora la eficiencia en el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles [15, 16]. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías en el ámbito educativo sigue siendo limitada, a pesar de su creciente importancia en la industria [17].

La literatura revisada indica que la enseñanza de tecnologías IoT en entornos universitarios puede potenciar la formación de profesionales con capacidades para gestionar la agricultura de precisión [18]. Estudios previos han resaltado que la

introducción de hardware programable, como Arduino y ESP32, en programas educativos facilita la comprensión de conceptos tecnológicos y promueve la integración de disciplinas como la agronomía y la ingeniería [19].

Revisión de frameworks educativos existentes en IoT

El desarrollo de frameworks educativos para la enseñanza de tecnologías emergentes ha sido objeto de estudio en diversas disciplinas [20]. Modelos previos han demostrado que la inclusión de aprendizaje basado en proyectos y el uso de plataformas de simulación y hardware real aumentan la retención de conocimientos y la motivación de los estudiantes [21, 22].

En el ámbito de la agricultura de precisión, la literatura disponible muestra una carencia de enfoques estructurados para la enseñanza de IoT. Algunos estudios han propuesto modelos de enseñanza que incluyen el uso de sensores proximales para el monitoreo de cultivos, aunque la mayoría de estos frameworks se han centrado en la automatización industrial y no en la educación en el ámbito agronómico [23]. Por ello, este estudio busca llenar ese vacío proporcionando un marco teórico para la implementación de IoT en la formación agronómica.

Impacto del framework en la formación de competencias digitales

El desarrollo de competencias digitales es un aspecto clave en la modernización del sector agrícola. Según investigaciones recientes, la formación en tecnologías IoT no solo mejora la capacidad técnica de los estudiantes, sino que también fomenta habilidades transversales como la resolución de problemas, el trabajo en equipo y el pensamiento analítico [22].

Además, estudios han señalado que la integración de IoT en la educación puede:

- Mejorar la empleabilidad de los graduados, al alinearse con las demandas del mercado laboral [22].
- Facilitar la transición a modelos de agricultura inteligente, promoviendo el uso eficiente de datos en la toma de decisiones agronómicas [18].
- Incentivar la innovación y el emprendimiento, ya que el acceso a tecnologías como sensores y microcontroladores permite a los estudiantes desarrollar soluciones aplicadas a problemas reales en el campo [24].

Posibles limitaciones y desafíos de la implementación

A pesar de sus beneficios potenciales, la adopción de IoT en la educación en el área agro, enfrenta ciertos desafíos. La literatura revisada destaca obstáculos como la falta de recursos tecnológicos en algunas instituciones y la necesidad de formación docente especializada para la implementación de estos frameworks [25].

Otros estudios sugieren que la complejidad de las plataformas IoT puede representar una barrera para algunos estudiantes sin formación previa en electrónica o programación, lo que resalta la importancia de diseñar un modelo pedagógico progresivo que permita una introducción gradual a estos conceptos [23].

Implicaciones del estudio y recomendaciones futuras

Este marco teórico establece una base para el diseño e implementación de framework educativos en IoT aplicados a la agricultura de precisión. De acuerdo con la literatura previamente revisada en este trabajo, su incorporación en programas académicos podría modernizar la enseñanza agrícola, promoviendo una educación más alineada con las necesidades del sector agroalimentario.

Futuras investigaciones deberían enfocarse además en explorar estrategias para integrar IoT con otras tecnologías emergentes, como drones y sensores satelitales.

4. Conclusiones

La creciente digitalización del sector agrícola ha puesto de manifiesto la importancia de integrar tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) en la educación agronómica. Sin embargo, la literatura revisada indica que la adopción de estas tecnologías en entornos educativos aún es limitada, lo que genera una brecha entre la formación académica y las demandas del mercado laboral en la agricultura de precisión.

En conjunto, los resultados muestran que el framework educativo ha contribuido de forma significativa al fortalecimiento de las competencias técnicas del alumnado en el uso de tecnologías IoT aplicadas a la Agricultura de Precisión. Se evidencian avances en áreas clave como la interpretación de datos, el manejo de placas de desarrollo y la resolución de problemas técnicos básicos.

No obstante, se identificó una menor confianza en el uso de plataformas en la nube, como ThingsBoard o Arduino IDE, lo que señala una brecha formativa específica en la gestión y visualización de datos. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de integrar con mayor profundidad este tipo de herramientas en el currículo para avanzar hacia una formación digital más completa.

Asimismo, el desarrollo equilibrado entre competencias como el uso de sensores y la interpretación de datos agronómicos refuerza la importancia de una enseñanza integrada. La relación entre la resolución de problemas técnicos básicos y avanzados respalda también la progresividad del enfoque formativo adoptado.

Estos hallazgos sugieren que la integración de IoT en la educación agronómica podría mejorar la adquisición de competencias e incrementar la empleabilidad de los egresados, además de fomentar la innovación tecnológica en este sector. Sin embargo, también se han identificado desafíos como la necesidad de adquisición de conocimientos por parte de los docentes en este ámbito tecnológico, infraestructura tecnológica adecuada y enfoques pedagógicos progresivos para facilitar la adopción de estas herramientas.

En resumen, la incorporación de IoT en la educación de ámbito agronómico no solo responde a la transformación digital del sector, sino que también representa una oportunidad para modernizar los programas académicos y preparar a los futuros profesionales para los retos tecnológicos del siglo XXI.

Agradecimientos

Al Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas de Centro por su ayuda prestada en esta colaboración.

Referencias

1. Wolfert, S.; Ge, L.; Verdouw, C.N. Big data in smart farming – a review. Agric. Syst. 2017, 153, 113–123.
2. Kamilaris, A.; Prenafeta-Boldú, F.X. Deep learning in agriculture: A survey. Comput. Electron. Agric. 2018, 147, 70–90.
3. Dhanaraju, M.; Chenniappan, P.; Ramalingam, K.; Pazhanivelan, S.; Kaliaperumal, R. Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. Agriculture 2022, 12(10), 1745.
4. Ding, H.; Tian, J.; Yu, W.; Wilson, D.I.; Young, B.R.; Cui, X.; Li, W. The application of artificial intelligence and big data in the food industry. Foods 2023, 12(24), 4511.
5. Felicia, A.; Wong, W.K.; Loh, W.N.; Juwono, F.H. Increasing role of IoT in education sector: A review of Internet of Educational Things (IoEdT). In Proceedings of the 2021 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST), Kuching, Malaysia, 28–30 July 2021; IEEE: pp. 1–6.
6. Tabuenca, B.; Moreno-Sancho, J.L.; Arquero-Gallego, J.; Greller, W.; Hernández-Leo, D. Generating an environmental awareness system for learning using IoT technology. Internet Things 2023, 22, 100756.
7. Schmidt, M. Arduino: A Quick-Start Guide; Pragmatic Bookshelf: Dallas, TX, USA, 2015.
8. Lloret, J.; Sendra, S.; Garcia, L.; Jimenez, J.M. A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture. Sensors 2021, 21(21), 7243.
9. Vangala, A.; Das, A.K.; Kumar, N.; Alazab, M. Smart secure sensing for IoT-based agriculture: Blockchain perspective. IEEE Sens. J. 2020, 21(16), 17591–17607.
10. Arduino. Arduino. Available online: https://www.arduino.cc (accessed on 25 March 2025).
11. Arduino. Arduino IDE. Available online: https://www.arduino.cc/en/software (accessed on 1 March 2025).
12. Moodle. Moodle: Open-source learning platform. Available online: https://moodle.org/ (accessed on 3 March 2025).
13. Luna, S.M.M. Manual práctico para el diseño de la Escala Likert. Xihmai 2007, 2(4).
14. Creswell, J.W. Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches, 4th ed.; Sage Publications: Thousand Oaks, CA, USA, 2014.

15. Elijah, O.; Rahman, T.A.; Orikumhi, I.; Leow, C.Y.; Hindia, M.N. An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. IEEE Internet Things J. 2018, 5(5), 3758–3773.
16. GEMS Informatics. Internet of Things (IoT) in Agriculture | Case Study. Available online: https://gems.umn.edu/hands-on-learning-about-internet-of-things-in-agriculture (accessed on 25 March 2025).
17. Corrales, J.C.; Angelov, P.; Iglesias, J.A., Eds. Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II; Proceedings of the 2nd International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change (AACC'18), Cali, Colombia, 21–23 November 2018; Springer: Cham, Switzerland, 2018; Volume 893.
18. Appinventiv. Impact of IoT in the Agriculture Industry: Everything You Need to Know. Available online: https://appinventiv.com/blog/iot-in-agriculture-industry/ (accessed on 18 March 2025).
19. Leo-Ramírez, A.; Álvarez, J.; Gilarranz-Casado, C. Utilizing IoT systems to improve students' digital competency and awareness of environmental issues. Int. J. Eng. Educ. 2024, 40(4), 916–928.
20. Gabaldón Ibáñez, M.Á. Análisis de frameworks y soluciones para la IoT; Bachelor's Thesis, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, 2023. Available online: https://riunet.upv.es/handle/10251/198544 (accessed on 18 March 2025).
21. Chaudhary, R.R.; Jain, S.; Gupta, S. A critical review on hybrid framework for precise farming with application of Machine Learning (ML) and Internet of Things (IoT). J. Integr. Sci. Technol. 2024, 12(2), 730.
22. de Boer, P.S. The IoT, Easy as Anything? Uncovering the Importance of Digital Skills for the Internet of Things; Utrecht University, Netherlands, 2023.
23. TerraConnect. Challenges and Solutions in Implementing IoT in Agriculture. Available online: https://terraconnect.io/blogs/challenges-and-solutions-in-implementing-iot-in-agriculture (accessed on 10 March 2025).
24. Laverde Mena, J.A.; Laverde Mena, C.G. Internet de las cosas aplicado en la agricultura ecuatoriana: Una propuesta para sistemas de riego. Dilemas Contemp. Educ. Política Valores 2021, 8(2).
25. Dibbern, T.; Romani, L.A.S.; Massruhá, S.M.F.S. Main drivers and barriers to the adoption of Digital Agriculture technologies. Smart Agric. Technol. 2024, 8, 100459.

DESIGN THINKING COMO MÉTODO PARA GERAÇÃO DE TECNOLOGIAS EM COMUNIDADE RURAL

Larissa Haddad Souza Vieira [1], Raphael Magalhães Gomes Moreira [2,] Diná Castiglioni Printini [3]; Regiane Lima Partelli [4*]

[1] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; larissa.vieira@ifes.edu.br

[2] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; raphael.moreira@ifes.edu.br

[3] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; dina_castiglioni@hotmail.com

[4] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; regianelimapartelli@gmail.com

* Correspondência: larissa.vieira@ifes.edu.br

Resumo: O meio rural possui grande relevância socioeconômica no Brasil, apresentando problemas a serem resolvidos e grande potencial de desenvolvimento de tecnologias e inovação. Agentes públicos e privados são importantes aliados na identificação, desenvolvimento, transferência e difusão de tecnologias para superação de problemas nessas áreas. Este estudo objetivou identificar percepções de uma comunidade rural quanto a problemas a serem resolvidos em sua sociedade, elencando possíveis alternativas de soluções tecnológicas para essas questões. Partindo de uma perspectiva bottom-up de elaboração e implementação de ações, esta pesquisa exploratória qualitativa se apoia nas ferramentas relacionadas ao *Design Thinking* e *Human Centered Design* (HCD), realizando os processos de Inspiração e Ideação. Para coleta de dados foi feita entrevista remota; para categorização e análise, a Análise de Conteúdo. Mesmo sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e inovações aplicadas à agropecuária, para melhor produtividade e qualidade dos produtos, Tecnologias Convencionais não foram mencionadas pelos entrevistados como sendo prioritárias. A viabilização do acesso a tecnologias já consolidadas foi a principal solução apontada para os problemas, caracterizando-se como Tecnologias Sociais fundamentais para geração de dinâmicas sociais e econômicas de inclusão social e desenvolvimento rural sustentável, promovendo impactos relevantes na comunidade rural.

Palavras-chave: Tecnologias Sociais; Desenvolvimento Rural; *Human Centered Design*; Agenda de Políticas Públicas.

1. Introdução

Frequentemente relacionado a práticas “atrasadas” e obsoletas de vida e produção, o meio rural tem se desenvolvido tecnologicamente a partir do crescimento e difusão da chamada Agricultura 4.0 e, em última instância, 5.0. Apesar disso, muitas ainda são as dificuldades enfrentadas em comunidades rurais, sendo a minimização

desses desafios objeto relevante de políticas públicas e da atuação de diversos agentes nos sistemas, arranjos e cadeias produtivas relacionadas a esses ambientes.

A criação, desenvolvimento e transferência de tecnologias destinadas ao Agronegócio vem sendo realizada há décadas por instituições de ensino e pesquisa, destacando-se recentemente a atuação dos Institutos Federais, criados pela Lei 11.892/2008 (BRASIL, 2008), que em seu artigo 6º define como finalidades institucionais realizar e estimular a pesquisa aplicada e o desenvolvimento científico e tecnológico, promovendo a produção, o desenvolvimento e a transferência de tecnologias e consolidando e fortalecendo os Arranjos Produtivos Locais (APLs).

Os arranjos ou sistemas produtivos locais relacionados ao meio rural possuem grande relevância socioeconômica em grande parte do território brasileiro, apresentando grandes questões ou problemas a serem resolvidos e, portanto, grande potencial de desenvolvimento de tecnologias e inovação. Nessa perspectiva, a atuação de instituições e apoio ao desenvolvimento de tecnologias deve ser embasada nas necessidades reais das comunidades a serem atendidas, maximizando recursos e realizando contribuições relevantes, a partir da compreensão de que sua relevância social perpassa pela articulação e atendimento de demandas de públicos-alvo externos à instituição, relacionando-se diretamente às comunidades, organizações e setores produtivos de seu entorno (LEME, AGUIAR, REZENDE, 2019).

Desta forma, o estudo ora proposto se alinha à concepção de que as ações em pesquisa aplicada e desenvolvimento de tecnologias possuem relevância na medida em que solucionam problemas reais e possuem potencial de impacto social e/ou econômico, a partir de processos dialógicos baseados em fluxos decisórios em sentido *bottom-up*. A partir desse pressuposto, adotou-se a metodologia de *Design Thinking*, apoiada pelo processo de Estratégia Centrada no Ser Humano (HCD), para identificação de problemas e possíveis soluções tecnológicas voltadas a uma comunidade rural do entorno do Instituto Federal do Espírito Santo campus Itapina.

Objetivou-se identificar percepções de membros de uma comunidade rural quanto a problemas a serem resolvidos em sua região, elencando possíveis alternativas de soluções tecnológicas para essas questões, a partir de ferramentas apoiadas em *Design Thinking* e *Human-Centered Design* (HCD). Especificamente, buscou-se: identificar as comunidades rurais do entorno, definindo a comunidade a ser estudada; identificar os principais problemas e necessidades enfrentados por parte da comunidade escolhida, conforme a metodologia de Design Centrado no Ser Humano (HCD) aplicada ao *Design Thinking* (DT) na fase de “inspiração”; prospectar

junto à comunidade possíveis soluções para os problemas apontados, conforme proposto pela metodologia HCD aplicada ao DT na fase de "ideação".

Buscou-se evidenciar sistematicamente as vontades e necessidades coletivas, bem como possíveis caminhos a serem seguidos para a solução de problemas, a melhoria de sua qualidade de vida e o desenvolvimento socioeconômico comunitário, tendo em vista elementos como a articulação entre seus membros e seu empoderamento social apoiado na participação ativa, na construção de redes baseadas na confiança e no conhecimento, e na otimização dos recursos disponíveis, bem como o alcance de maior produtividade, maior lucratividade e melhores resultados econômicos.

2. Considerações Metodológicas

O estudo se apoia nas ferramentas relacionadas ao *Design Thinking* (DT) e *Human-Centered Design* (HCD), a partir dos estudos de Brown (2018), Enactus Brasil (2017), Endeavor Brasil (2019), ITS Brasil (2004) e Trauer, Valdati e Fialho (2018), sendo caracterizado como qualitativo e classificado como pesquisa exploratória. Foi realizado por pesquisadores do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes campus Itapina), localizado na Zona Rural do município de Colatina, que busca atuar como aliado na identificação, desenvolvimento, transferência e difusão de tecnologias, especialmente as relacionadas às atividades rurais e mais especificamente as desenvolvidas em seu entorno, de acordo com as demandas e problemas vivenciados nas comunidades da região.

A fim de definir a comunidade a ser estudada, foram utilizadas informações sobre as principais comunidades do entorno do Ifes, coletadas em estudo anterior da equipe de pesquisa. Os critérios utilizados se relacionam à proximidade e facilidade de acesso, sob perspectiva tanto de logística quanto de rede de contatos. A partir da base de dados, foi identificada a comunidade de São Pedro Frio, que possui grande proximidade ao campus, bem como maior facilidade de contato interpessoal pelos pesquisadores, por já haver estreita relação institucional por meio de projetos de pesquisa e de projetos, cursos e eventos de extensão.

No processo de Inspiração, objetivou-se realizar o levantamento e compreensão de problemas reais a serem resolvidos nesta comunidade rural. Para isso, foi utilizada como ferramenta de coleta de dados a entrevista remota assíncrona com atores relevantes na comunidade de São Pedro Frio. Foi utilizado aplicativo de mensagens online Whatsapp, por se tratar da forma mais utilizada pelos moradores locais para se comunicarem diante das dificuldades apresentadas quanto ao sinal de telefone celular, fixo e internet. O planejamento inicial, de realização de grupos focais, foi

inviabilizado pelo período de distanciamento social em função da Pandemia de Covid-19. A seleção desses atores ocorreu por meio da indicação de líderes comunitários e parceiros institucionais da equipe de pesquisa. Foram entrevistados 7 atores relevantes, com perfis distintos, sendo utilizadas as respostas de 6 entrevistas, já que uma delas foi inutilizada, em função de readequações metodológicas ao longo do estudo. Todos os entrevistados firmaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, conforme orientações do Comitê de Ética em Pesquisa do Ifes, por meio do *Google Forms*®. A análise dos dados coletados, visando à síntese dos principais problemas a serem resolvidos, foi feita pela categorização das questões apontadas, conforme a metodologia de Análise de Conteúdo proposta por Bardin (2011).

No processo de Ideação, após síntese dos dados coletados no processo supradescrito, buscou-se identificar possibilidades de solução desses problemas por meio do desenvolvimento de tecnologias convencionais, voltadas a soluções para o processo produtivo, bem como da proposição de tecnologias sociais. Para ambos os processos de inspiração e de ideação, as respostas foram categorizadas, visando identificar as questões mais relevantes apontadas pelos entrevistados. O processo de implementação de soluções, incluindo a elaboração de possíveis ações, projetos e desenvolvimento de produtos (“prototipagem” e “teste”), não foi objeto deste estudo.

3. Resultados

Comunidades rurais possuem dinâmicas próprias e questões específicas a serem resolvidas, tendo grande representatividade na região de Colatina e atuando diretamente no setor agropecuário, um dos grandes responsáveis pela manutenção da economia local. Dessa forma, compreender suas necessidades de acordo com a perspectiva das pessoas que nelas vivem é fundamental para que o desenvolvimento local e regional seja efetivo.

Os moradores da comunidade de São Pedro Frio possuem uma percepção geral muito positiva quanto ao local e sua vivência neste espaço, apontando bons sentimentos e características agradáveis, como “gosto daqui porque o clima é frio e agradável”, “viver em São Pedro Frio é um privilégio” e “além das belezas naturais, o nosso clima é especial, clima de montanha, agradável e com ar puro”.

As principais questões apontadas pelos entrevistados se relacionam ao fato de que a comunidade rural se vincula fortemente à produção de café, não apenas conilon, como as demais regiões produtoras em seu entorno, mas também do tipo arábica. Essa diversificação produtiva foi mencionada com frequência, em função da

diferenciação do clima local da comunidade, que é mais frio do que a média regional. Ainda, os entrevistados mencionaram algumas mudanças na atuação dos produtores rurais ao longo do tempo, buscando adequar-se ao microclima e às demandas de mercado. Apesar disso, a monocultura cafeeira e de eucalipto foi indicada como uma questão a ser superada, por meio do plantio de outras variedades de culturas, tais como frutas (manga, coco e outras), e da realização de outras atividades como a pecuária.

Todos os entrevistados disseram que gostam de viver em São Pedro Frio, pelo fato de ser um lugar tranquilo, ter um clima agradável, por ter pequenas propriedades com características familiares, não ter muito movimento, além de suas belezas naturais. Destaca-se a forte relação entre as pessoas e o local onde vivem, principalmente porque muitos vão para lá e aí permanecem por causa do trabalho, especialmente a atividade agrícola, dando centralidade à atividade laboral em suas vidas. O trabalho das pessoas na própria comunidade (propriedades rurais) ocupa lugar de destaque na vida dos entrevistados, sendo a comunidade rural mais do que um local de moradia, trata-se também de seu local de sustento e de desenvolvimento profissional e familiar.

A questão da tecnologia aplicada à atividade agrícola surgiu indiretamente, destacando-se a adesão a métodos simples e mais difundidos de manejo para melhoria da produtividade, como se pode observar na fala do Entrevistado 5, a seguir: *"Na roça aprendi a capinar, uma coisa que hoje poucas pessoas usam, devido a 'veneno' e maquinário. Aprendi a trabalhar com motosserra, cerca, plantios e a 'panha' do café foi se desenvolvendo aos poucos. Anteriormente os cafés não eram podados nem desbrotados, o que diminuía o rendimento na 'panha', e hoje o povo usa muito tratar da lavoura para ter mais rendimento".*

No processo de empatia, adotado conforme o *Design* Centrado no Ser Humano aplicado ao *Design Thinking*, os entrevistados foram questionados sobre os principais problemas, dificuldades ou desafios enfrentados na comunidade de São Pedro Frio. Por meio da Análise de Conteúdo, foi conduzido o processo de inspiração, a partir da identificação das categorias e subcategorias de respostas expressas na Tabela 1.

Tabela 1. Categorias e Subcategorias de Problemas Identificados

CATEGORIA	SUBCATEGORIAS
COMUNICAÇÃO	- Rede de Celular - Rede de Internet - Telefonia
EDUCAÇÃO / CAPACITAÇÃO	- Acesso a informações e tecnologias (assist. técnica) - Capacitação para empreender - Técnicas de produção - Infraestrutura escolar
MEIO AMBIENTE	- Água (Períodos de Seca; Captação e drenagem hídrica; Mau uso da água)
MOBILIDADE URBANA	- Estrada ruim - Transporte público escasso
MONOCULTURA	- Café - Eucalipto
RELAÇÕES SOCIAIS	- Pouca Interação da comunidade - Participação e Mobilização comunitária - Poucas opções de lazer
RENDA	- Desvalorização dos produtos - Alto custo de atividade agroecológica - Alto custo de insumos agrícolas - Baixo preço do café - Pouca produtividade - Difícil acesso a mercados - Baixa remuneração pelo trabalho - Pouca Diversificação de atividades - Êxodo Rural
SAÚDE	- Inexistência de Posto de Saúde - Falta de médicos - Visita restrita de agentes de saúde

De acordo com a Tabela 1, foram identificadas 8 categorias principais de problemas existentes na comunidade rural pesquisada: Comunicação, Educação/Capacitação, Meio Ambiente, Mobilidade Urbana, Monocultura, Relações Sociais, Renda e Saúde. Os problemas relacionados à Comunicação referem-se principalmente ao fato de a comunidade não possuir rede adequada de celular nem de internet, sendo necessário subir em morros e andar pelas estradas para conseguir sinal. A telefonia também é precária, só funcionando com uma antena externa instalada em cada residência, exceto em época de chuva, quando não há nenhuma forma de comunicação disponível. Isso impacta diretamente sobre a vida dos moradores, em vários aspectos, implicando também sobre outras categorias de problemas

identificados, como o acesso a informações e tecnologias, a oportunidades de capacitação e formação em áreas e temas diversos, entre outros. A comunicação é fundamental para o funcionamento das cadeias produtivas locais, propiciando melhores informações e oportunidades desde a negociação de insumos até o acesso a mercados consumidores para seus produtos.

O acesso a São Pedro Frio, na época da coleta de dados, era exclusivamente por meio de estrada de chão, não asfaltada, tornando o trânsito difícil e perigoso em épocas de chuva, devido à lama e ao aclive, o que foi mencionado por todos os entrevistados, sendo o problema da Mobilidade Urbana um dos mais evidentes. Logo após a realização das entrevistas, foi iniciada a pavimentação da via principal que leva à comunidade. Mesmo as vias secundárias sendo mantidas sem pavimentação, sendo necessária a manutenção periódica das mesmas, o asfalto deverá contribuir para a diminuição do problema da mobilidade, facilitando o transporte de pessoas e produtos. A partir disso, espera-se que a oferta de transporte público também seja melhorada.

A categoria Educação / Capacitação é formada por questões relacionadas tanto à educação formal quanto informal, em cursos regulares ou de formação inicial e continuada, evidenciando a necessidade de mais opções de capacitação sobre técnicas de produção agrícola e agroindustrial, empreendedorismo, identidade local e outros temas. No que se refere à educação formal, foi ressaltada a necessidade de melhoria em termos de ambiência, infraestrutura e oferta em diferentes modalidades. Foi identificada também a necessidade de maior acesso a informações e tecnologias por meio de assistência técnica especializada, principalmente no que se refere ao cuidado com a terra e ao manejo de culturas agrícolas.

Os entrevistados mencionaram problemas relacionados ao meio ambiente, principalmente quanto à disponibilidade hídrica. A escassez de água, causada pela mudança no microclima local, pela falta de práticas conservacionistas e de captação e drenagem, e pelo uso inadequado, foi agravada pelo período de estiagem e seca enfrentado na região. A comunidade rural estudada se desenvolve em torno da produção agropecuária, principalmente da monocultura de café e eucalipto, sendo a falta de diversificação de produtos (categoria Monocultura) um problema identificado pelos entrevistados.

A falta de diversificação de atividades compõe outra categoria, relacionada à Renda dos entrevistados, considerada baixa ou limitada, pois impacta diretamente sobre a mesma. Outros elementos referentes à renda, mencionados pelos entrevistados, são: desvalorização dos produtos agrícolas pelo mercado consumidor; alto custo

derivado da atividade agroecológica; alto custo de insumos agrícolas; oscilação e baixo preço do café, que depende do mercado de *commodities*; baixa produtividade agrícola e agroindustrial; dificuldade de acesso a diferentes mercados; e baixa remuneração atribuída ao trabalho rural. A baixa renda e o trabalho desgastante relacionados ao meio rural e à atividade agrícola, segundo os entrevistados, têm provocado o êxodo rural por parte de pessoas em busca de melhores oportunidades de trabalho, estudo e condições de vida em áreas urbanas, provocando a diminuição da população e densidade demográfica na região.

Foi destacada também a necessidade de desenvolvimento das Relações Sociais na comunidade. Mesmo existindo uma associação de produtores rurais, há pouca interação entre os membros da comunidade, pouca participação e mobilização comunitária, bem como escassez quanto às opções de lazer. Segundo alguns entrevistados, poucas pessoas se envolvem na organização comunitária e interagem com outros moradores; em alguns casos, há pouco interesse na participação, em outros, a comunidade não é muito receptiva a novos moradores locais.

A última categoria mencionada foi a Saúde, dada a inexistência de Posto de Saúde na comunidade, além da escassez de médicos e outros profissionais da saúde em função da difícil mobilidade (estrada ruim) e da natureza da atividade agrícola, que ocupa todo o dia. De acordo com um dos entrevistados, "*é feita a visita do agente de saúde, mas o trabalho frequente na roça muitas vezes impossibilita que o agente encontre alguns moradores em seu domicílio. Assim, os moradores precisam sair da comunidade e procurar assistência médica na cidade mais próxima*".

Após a identificação dos problemas existentes na comunidade pelos seus moradores, foi solicitado a eles que apontassem possíveis soluções para os mesmos. O processo de ideação foi formado pela análise de conteúdo das soluções apontadas pelos entrevistados. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Categorias de Problemas e Respectivas Soluções apontadas pelos Entrevistados

PROBLEMA	SOLUÇÃO
COMUNICAÇÃO	- Instalação de Rede de Celular, Internet e Telefonia
EDUCAÇÃO / CAPACITAÇÃO	- Maior investimento em assist. técnica por instituições ATER - Mais capacitações ofertadas pelo Ifes Itapina e Senar - Maior investimento em infraestrutura escolar
MEIO AMBIENTE	- Captação e drenagem hídrica - Uso adequado da água - Práticas conservacionistas - Agroecologia
MOBILIDADE URBANA	- Pavimentação das Estradas - Maior investimento em Transporte público
MONOCULTURA	- Diversificação de produtos e atividades
RELAÇÕES SOCIAIS	- Fortalecimento da Associação existente - Economia Solidária
RENDA	- Diversificação de atividades - Agregação de valor e qualidade aos produtos - Acesso a mercados fornecedores para diminuição dos custos - Acesso a mercados consumidores para aumento do faturamento - Acesso a tecnologias para aumento da produtividade
SAÚDE	- Instalação de Posto de Saúde - Pavimentação das Estradas - Ampliação do itinerário e horários de visita de agentes de saúde

As soluções apontadas pelos entrevistados para os problemas relatados envolvem, em sua maioria, o acesso a tecnologias, sejam elas convencionais ou sociais, sendo "Tecnologia" o termo mais relevante e frequente apresentado na nuvem de palavras. Os participantes mencionaram a tecnologia em diversos âmbitos, seja para buscar uma agricultura mais sustentável, sugerindo o uso de agroecologia na região, seja para agregar interesse aos alunos em atividades educativas, pois, segundo um dos entrevistados, *"a tecnologia chama atenção para o público mais jovem"*. As tecnologias citadas para a solução do problema com Comunicação foram as relacionadas à instalação de Rede de Celular, Internet e Telefonia, o que, de acordo com os entrevistados, poderá auxiliar em várias questões, dentre elas *"segurar os mais jovens na zona rural", "ver a previsão do tempo" e "o que acontece na região e no mundo"*. No que se refere aos problemas relacionados à Educação e à Capacitação, foi indicada a relevância de se investir mais nas atividades de assistência técnica por parte de instituições de Assistência Técnica e Extensão Rural

(ATER), como o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), para propiciar melhor orientação e acesso a tecnologias de produção agrícola. Ainda, foi destacado como importante ação para a melhoria da qualidade da educação o maior investimento em infraestrutura escolar na região, bem como a ampliação do atendimento à população por meio da criação de novas modalidades de ensino formal, com a introdução da "educação do campo", por meio da implantação de escola família agrícola e da Educação de Jovens e Adultos (EJA).

Também foram citadas as capacitações em atividades de formação inicial e continuada, especialmente em temas relacionados a técnicas de produção agrícola e agroindustrial, empreendedorismo, identidade local e outros, ressaltando-se a necessidade de fortalecer as parcerias já existentes, além de buscar novas possibilidades. As instituições de ensino, de pesquisa e extensão, de desenvolvimento tecnológico e de apoio ao desenvolvimento regional são fundamentais para a difusão e acesso a tecnologias, tanto recentes (inovações) quanto já consolidadas. Nesse sentido, destacou-se o Ifes Itapina, que se localiza no entorno da comunidade (distante aproximadamente 20km), pois a instituição realiza projetos na região, cursos, eventos e outras atividades de capacitação, além de agregar diversos membros da comunidade em cursos regulares (técnicos e superiores) na educação formal. Outra instituição mencionada com frequência foi o Senar (Serviço Nacional de Aprendizagem Rural). Para os entrevistados, o Ifes campus Itapina, junto com a Prefeitura Municipal de Colatina, Sindicatos dos Trabalhadores Rurais, Sindicato Rural, Senar e outros, pode oferecer algumas soluções para a comunidade como projetos agrícolas; capacitação na área de sustentabilidade e tecnologia no campo, por exemplo "projetos de estufa para aproveitamento do sol para a secagem do café em vez do uso de secador", ou ainda "otimizar o uso de estufa para a desidratação de frutas na entressafra de café"; capacitação para o processamento e beneficiamento de produtos, como já tem sido feito no evento anual "Semana da Agricultura Familiar", entre outros.

A fim de minimizar os impactos relacionados ao Meio Ambiente e buscar um desenvolvimento local mais sustentável, os entrevistados mencionaram a captação e drenagem hídrica, o uso adequado da água e a adoção de práticas conservacionistas. Para os entrevistados, a população deve realizar a adequada captação, drenagem e uso de recursos hídricos, preservando o meio ambiente, recuperando nascentes, investindo em manejo sustentável, realizando práticas conservacionistas, construção de caixas secas e barragens para que o recurso hídrico seja infiltrado no solo e abasteça os lençóis freáticos e rios da região, entre outras formas de cuidado.

A pavimentação das estradas foi unanimidade entre os entrevistados como solução para grande parte dos problemas da comunidade, notadamente o de Mobilidade Urbana, indicando-se também a necessidade de maior investimento em transporte público, com maior número de horários e itinerários disponíveis, além da melhoria da qualidade dos veículos disponíveis. Buscando reduzir a prevalência da atividade de Monocultura, com prioridade para a produção de café e eucalipto, além de minimizar os impactos negativos do investimento em um única cultura agrícola, foi indicada diversificação de produtos e atividades, buscando outras alternativas de produção e agregação de valor a produtos, investindo por exemplo na fruticultura e na atividade agroindustrial, com a produção de massas, geleias, conservas, doces, mel, entre outros, como já é feito por muitos produtores da região. Para os entrevistados, o problema referente às Relações Sociais pode ser superado a partir de ações como: fortalecimento da Associação de Produtores Rurais existente na localidade; o acesso e difusão de tecnologias de comunicação; e o desenvolvimento de atividades voltadas à Economia Solidária, que foi abordada como estratégia de desenvolvimento local, soberania alimentar, destinação de produtos, acesso a mercados e integração entre os moradores/produtores da região.

A superação das dificuldades existentes com relação à Renda dos moradores da comunidade rural foi associada a soluções como a diversificação de atividades de produção e serviços como o Agroturismo; o acesso a tecnologias para aumento da produtividade; o acesso a novos e diversificados mercados fornecedores para diminuição dos custos e a mercados consumidores para aumento do faturamento com a comercialização da produção. Realizar o beneficiamento de produtos primários (incluindo do café) e o investimento em sua qualidade, agregando valor aos produtos gerados, também foi indicado como forma de diminuir a dependência da oscilação de mercados de commodities e melhorar a renda familiar. Para a melhoria do atendimento à Saúde da população local, indicou-se: a instalação de um Posto de Saúde na comunidade; a pavimentação das estradas, facilitando o deslocamento de profissionais da saúde para atendimento na região; a ampliação do itinerário e dos horários de visita de agentes de saúde, oportunizando o atendimento a todo o perímetro da comunidade rural.

4. Discussão

A análise dos resultados, a partir do conceito de Tecnologias Sociais (TS), destaca a importância da apropriação e disseminação de soluções tecnológicas acessíveis e adaptadas às necessidades locais, promovendo inclusão social, sustentabilidade e desenvolvimento comunitário. As Tecnologias Sociais são caracterizadas por seu desenvolvimento participativo e pela apropriação coletiva, sendo aplicadas para solucionar problemas sociais e ambientais específicos. Os resultados do estudo

demonstram que a comunidade rural identificou como essencial o acesso a tecnologias, tanto convencionais quanto sociais, para melhorar a qualidade de vida e promover maior sustentabilidade econômica e ambiental.

A ênfase no acesso à informação e comunicação via internet e telefonia reflete a necessidade de reduzir a exclusão digital, permitindo que os moradores se integrem a redes de conhecimento, acessem previsões climáticas e ampliem sua conectividade com o mercado e serviços públicos. Esse tipo de tecnologia, quando implementado de forma acessível e inclusiva, configura-se como Tecnologia Social ao contribuir para a democratização do conhecimento e fortalecimento comunitário.

A necessidade de fortalecimento da educação e capacitação, com a participação de instituições de ensino e extensão rural, também se alinha ao conceito de TS. O apoio ao desenvolvimento de Arranjos Produtivos Locais (APLs) e à adoção de metodologias como Educação do Campo e Escola Família Agrícola são exemplos de estratégias que permitem desenvolvimento sustentável baseado no conhecimento comunitário e na valorização da cultura e identidade local. Ao indicar a importância da formação técnica e empreendedora, os entrevistados reforçam a necessidade de ferramentas acessíveis e de fácil adoção. Isso demonstra a relevância da transferência e difusão de tecnologias e conhecimentos, que, ao serem adaptados à realidade local, promovem inclusão produtiva e autonomia.

A ênfase na diversificação produtiva e na agroecologia indica que os moradores reconhecem a necessidade de um modelo produtivo mais sustentável, menos dependente da monocultura e do uso intensivo de insumos externos. A implementação de práticas como manejo sustentável da água, conservação de solos e adoção de práticas agroecológicas são exemplos de TS, pois promovem impacto social positivo, garantem maior segurança alimentar e reduzem a vulnerabilidade ambiental. A adoção de estufas para secagem de café e desidratação de frutas, por exemplo, demonstra que a apropriação tecnológica pode ocorrer sem a necessidade de investimentos complexos, desde que seja adaptada às necessidades locais. Esse tipo de inovação, ao integrar conhecimento tradicional e científico, caracteriza-se como uma Tecnologia Social de alto impacto.

A diversificação de atividades econômicas, incluindo o agroturismo e a produção agroindustrial, está alinhada ao conceito de TS, pois promove a valorização dos recursos locais, a agregação de valor a produtos de origem agrícola, a geração de renda e o fortalecimento da identidade comunitária. A Economia Solidária aparece como uma estratégia essencial, permitindo cooperação entre produtores, maior participação comunitária e redução da dependência de intermediários. O

fortalecimento das associações comunitárias e da organização social é outro pilar das TS, pois possibilita maior autonomia dos moradores na gestão de seus negócios, favorecendo a articulação de redes locais para comercialização e acesso a mercados diferenciados e mais rentáveis.

A pavimentação de estradas e a melhoria no transporte público, embora sejam elementos de infraestrutura tradicional, podem ser vistas como TS quando impactam diretamente na qualidade de vida e no acesso a serviços básicos. O mesmo se aplica à instalação de um posto de saúde e à ampliação do atendimento médico, garantindo acessibilidade aos serviços essenciais e promovendo maior bem-estar social.

5. Conclusões

O estudo apresenta as principais dificuldades apontadas por moradores da comunidade São Pedro Frio, em Colatina-ES, bem como possíveis soluções para minimizar esses problemas. Embora a comunidade tenha sido caracterizada como familiar, tranquila de se viver, com um clima agradável e até como “paraíso”, as principais dificuldades identificadas se relacionam ao acesso à região (transporte e mobilidade), comunicação, ambiente (em especial relacionado ao uso da água) e acesso a tecnologias. A tecnologia, mais especificamente a viabilização de seu acesso, foi apontada como principal forma de solução para os problemas apontados, otimizando e aproveitando o grande potencial agrícola, empresarial e comunitário da região.

A adoção de tecnologias, mesmo que sejam simples, tende a minimizar dificuldades enfrentadas na atividade rural, especialmente quanto ao árduo processo produtivo, no cultivo agrícola, no manejo agropecuário, na produção agroindustrial, no acesso a mercados. Mesmo havendo necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à atividade agropecuária, com a geração de inovação para a melhoria da produtividade e qualidade dos produtos, essa característica atribuída prioritariamente a Tecnologias Convencionais não foi mencionada como sendo prioritária para os participantes do estudo.

As ações apontadas pelos entrevistados aos problemas por eles identificados, ao longo da condução do processo de *Design Thinking*, caracterizam-se como Tecnologias Sociais, pois, conforme a definição de Thomas (2009), são estratégias a serem implementadas para a solução de problemas sociais e ambientais. Nesse sentido, mesmo na maior parte das vezes não sendo invenções ou novidades a serem desenvolvidas especialmente para a solução de seus problemas, trata-se do acesso a ferramentas, métodos e arranjos organizacionais já existentes e em geral

já consolidados na realidade urbana, para que sejam geradas dinâmicas sociais e econômicas de inclusão social e de desenvolvimento rural sustentável, promovendo impactos relevantes na comunidade rural. Tecnologias sociais derivadas da cooperação entre os membros desta comunidade e de seu protagonismo também são importantes ferramentas para a superação de dificuldades e o desenvolvimento da região.

A adoção de tecnologias, em especial as tecnologias sociais, tende a minimizar dificuldades enfrentadas no cotidiano rural, melhorando a qualidade de vida na região e reduzindo a migração para áreas urbanas, favorecendo a permanência no meio rural (de maneira agradável e menos sofrida), a geração de novas oportunidades e o processo sucessório em propriedades rurais.

Os resultados indicam que, embora a comunidade reconheça a importância de Tecnologias Convencionais, é a adoção de Tecnologias Sociais que se destaca como solução prioritária para os problemas identificados. O acesso a tecnologias já consolidadas, quando mediado por educação, organização comunitária e sustentabilidade, pode transformar a realidade local e impulsionar o desenvolvimento rural de forma participativa e inclusiva.

Dessa forma, a implementação das soluções apontadas pelos entrevistados deve considerar políticas públicas voltadas à difusão de Tecnologias Sociais, fortalecendo a articulação entre comunidades, instituições de ensino e órgãos de fomento, garantindo um impacto duradouro no território analisado.

Sugere-se, para estudos futuros, a realização do processo de implementação de soluções, incluindo a elaboração de possíveis ações, projetos e desenvolvimento de produtos (“prototipagem” e “teste”), proposto pela metodologia *Design Thinking*, conduzindo-se a proposição de ações concretas pelas instituições mencionadas (Ifes Itapina, Senar e outros) a fim de propiciar o acesso a tecnologias de produção que busquem solucionar os principais problemas apontados e oportunizar a melhoria da qualidade de vida aos moradores da região.

Contribuições dos Autores: Conceitualização, LHSV, DNP, RLP; metodologia, LHSV, DNP, RLP; análise formal, LHSV, DNP, RLP; validação LHSV, RMGM, DNP, RLP; investigação, DNP, RLP; curadoria de dados, DNP, RLP; redação – preparação do rascunho original, LHSV; redação – revisão e edição, LHSV, RMGM; supervisão, LHSV, RMGM. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu financiamento externo

Declaração do Comitê de Ética Institucional: O estudo foi conduzido de acordo com as diretrizes da Declaração de Helsinque e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Instituto Federal do Espírito Santo (74556323.3.0000.5072, 11/12/2019).

Declaração de Consentimento Informado: O consentimento informado foi obtido de todos os participantes envolvidos no estudo.

Declaração de Disponibilidade de Dados: Os dados coletados, que sustentam os resultados relatados, se encontram em posse dos pesquisadores, não havendo dados arquivados publicamente.

Agradecimentos: Instituto Federal do Espírito Santo campus Itapina.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

References

1. Brasil. Lei 11.892 de 29 de dezembro de 2008. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/l11892.htm>. Acesso 09/02/2025.
2. Leme, P. H. M. V.; Aguiar, B. H.; Rezende, D. C. A convergência estratégica em Arranjos Produtivos Locais: uma análise sobre a cooperação entre atores em rede em duas regiões cafeeiras. Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília, v. 57, n. 1, p. 25-42, jan./mar. 2019. Disponível em: https://www.revistasober.org/journal/resr/article/doi/10.1590/1234-56781806-94790570109. Acesso 22/04/25.
3. Brown, T. Design Thinking: Uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias. Alta Books Editora, 2018. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=UTNtDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT9&dq=DESIGN+THINKING&ots=e-p-SQzCy0&sig=c9CnkIJ5zFsgcpBSXsTr2bH6ry0#v=onepage&q=DESIGN%20THINKING&f=false>. Acesso 07/02/2025.
4. Enactus Brasil. Design Centrado no Ser Humano (HCD): a comunidade no centro do projeto. Enactus, 2017. Disponível em: <http://brazil.enactusglobal.org/wp-content/uploads/sites/2/2017/01/HCD-Ouvir.pdf>. Acesso 07/04/2019.
5. Endeavor Brasil. Design Thinking: ferramenta de inovação para empreendedores. Disponível em: <https://endeavor.org.br/tecnologia/design-thinking-inovacao/?gclid=Cj0KCQjwkIzlBRDzARIsABgXqV9UQsQYTu6CAUpJGxOtdMAYub_zQRahfkL20XtxYLjTbm4bBNONZ_0aAu9UEALw_wcB>. Acesso 03/04/2019.
6. ITS Brasil. Reflexões sobre a construção do conceito de tecnologia social. In: Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento; Fundação Banco do Brasil. Rio de Janeiro, 2004. 216p.Disponível em: <http://itsbrasil.org.br/publicacoes-artigos/>. Acesso 19/02/2024.
7. Trauer, E; Valdati, A.B.; Fialho, F.A.P. Uso do Design Centrado no Ser Humano na Cadeia Produtiva do Café com o Enfoque na Inovação Social. In: VIII Congreso Internacional de Conocimiento e Innovación. Guadalajara, 2018. Disponível em: <http://proceeding.ciki.ufsc.br/index.php/ciki/article/download/581/296/>. Acesso 03/04/2019.
8. Bardin, L. Análise de Conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011.
9. Thomas, H. Tecnologías para la inclusión social y políticas públicas en América Latina. In: Tecnologias sociais: Caminhos para a sustentabilidade; A. Otterloo (Ed.). Brasília, DF: Rede de Tecnologia Social, 2009.

SOFT SKILLS E TECNOLOGIAS COMO TEMAS RELEVANTES NA FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO AGRÔNOMO

Larissa Haddad Souza Vieira [1], Raphael Magalhães Gomes Moreira [2,] Dhebora Scardua Dalmonech [3]; Jadier Oliveira Cunha Junior [4*]

[1] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; larissa.vieira@ifes.edu.br

[2] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; raphael.moreira@ifes.edu.br

[3] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; dheborascardua@gmail.com

[4] Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina; jadier.cunha@ ifes.edu.br

* Correspondência: larissa.vieira@ifes.edu.br

Resumo: A agronomia é a ciência que estuda as fases da agropecuária, desde o desbravamento de novas áreas, a aração da terra, semeadura e criação de gado, até a comercialização desses produtos. Com a constante evolução das atividades comerciais dos produtos de origem agropecuária, este setor no Brasil é responsável por uma expressiva parcela das exportações e por suprir as crescentes demandas da população por alimentação. Com isso, o engenheiro agrônomo vem ganhando cada vez mais espaço dentro do mercado de trabalho, atuando em diferentes áreas e ambientes, e também trabalhando em prol do aumento da segurança alimentar em espaços reduzidos. Este trabalho objetivou identificar os principais temas de relevância para a formação do engenheiro agrônomo, a partir da percepção de estudantes de Agronomia, destacando principalmente os temas relacionados a Soft Skills e Tecnologias, em alinhamento com a consolidação da Agricultura 4.0 e iminência da 5.0. A pesquisa, de natureza descritiva e qualitativa, foi realizada no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Itapina, tendo como sujeitos da pesquisa os discentes do 1º ao 10º período do curso de bacharelado em Agronomia. Os dados foram coletados por meio de questionários eletrônicos. Concluiu-se que os conteúdos de fisiologia vegetal, fitopatologia, entomologia, fertilidade do solo e irrigação e drenagem são considerados pelos alunos como os mais importantes em sua formação acadêmica, não havendo destaque para a tecnologia e para soft skills como temas mais relevantes. O estudo ressalta a necessidade de repensar os paradigmas de formação de matrizes curriculares, valorizando temas exigidos cada vez mais dos profissionais no mercado de trabalho, tais como o desenvolvimento de habilidades intra e interpessoais e a adoção de inovações baseadas em tecnologias.

Palavras-chave: Mercado de Trabalho; Habilidades Socioemocionais; Inovação; Matriz Curricular.

1. Introdução

A Agronomia é a ciência que estuda integralmente as fases da agropecuária, desde a aração da terra, semeadura e criação de gado, até a comercialização desses produtos. A necessidade da atuação dos profissionais de Ciências Agrárias nasce com os primórdios da agricultura, necessária ao aumento das áreas cultivadas com o objetivo de produção de alimentos para atender ao contínuo crescimento da população (Alexandre, 2022; Parchen, 2007). Sendo a agricultura uma atividade voltada à produção alimentar com destino ao consumo humano e às necessidades animais, o termo agricultura engloba a arte de cultivar a terra, bem como a gestão do trabalho e as técnicas utilizadas para obter produtos agrícolas (Jesus e Peres, 2023). De acordo com Mazoyer e Roudart (2010), o processo de transformação da agricultura ocorre simultaneamente com a evolução da humanidade, devido às necessidades criadas para o estabelecimento na terra e na constante necessidade de alimento. No Brasil, a agronomia surgiu no início da colonização portuguesa, fortalecendo o cultivo agrícola no território. Mais tarde, durante a chamada Revolução Verde, o uso de sementes melhoradas, insumos agrícolas e mecanização contribuiu para o crescimento do curso de agronomia e da agricultura, que se destacou como uma das atividades mais rentáveis economicamente, mostrando-se receptiva à inserção das tecnologias comercializáveis desenvolvidas por empresas do setor (Melo e Brandão, 2020; Melo, 2020; Rosa e Leal, 2016).

Mediante o crescimento da agricultura, os profissionais da área de agronomia precisaram aperfeiçoar cada vez mais suas habilidades tanto técnicas (*Hard Skills*) quanto comportamentais (*Soft Skills*). As *Hard Skills* são habilidades técnicas, não comportamentais, sendo uma junção de tudo aquilo que se aprende na escola ou fora dela, em treinamentos, cursos, na graduação e/ou pós-graduação (PRIEBE, 2022). Já as *Soft Skills* são um conjunto de habilidades e competências relacionadas ao comportamento humano (FERNANDES SOUZA et al., 2023).

As soft skills estão intrinsecamente ligadas à sua área de atuação e ao cargo que se pessoa pretende alcançar (FIA, 2024), por isso é importante criar espaços que contribuam com a formação do Engenheiro Agrônomo de maneira coerente com o que se apresenta em sua realidade profissional, integrando conhecimentos técnicos a habilidades pessoais para a formação de profissionais completos, aptos à atuação no mercado de trabalho. Ao mesmo tempo, há dificuldades das instituições de Ensino Superior em adequar seus currículos às frequentes mudanças que ocorrem no mercado de trabalho, especialmente pelo fato de as revisões curriculares serem pouco frequentes. Dessa forma, o estudante e profissional de Agronomia se encontram frente à necessidade de buscar capacitações e formações continuadas

em temas extracurriculares, tanto dentro quanto fora da Academia, com o intuito de atualizar seus conhecimentos em consonância com o que o mercado exige.

O estudo objetivou identificar os principais temas de relevância para a formação do engenheiro agrônomo, a partir da percepção dos estudantes de Agronomia do Instituto Federal do Espírito Santo Campus Itapina, evidenciando a importância da abordagem integrada de conhecimentos e habilidades diversas.

2. Considerações Metodológicas

Este estudo possui natureza qualitativa e se caracteriza como pesquisa descritiva. De acordo com Gibbs (2009) a pesquisa de natureza qualitativa não é apenas voltada para números (pesquisa quantitativa) e somente os resultados encontrados dentro de laboratórios; ela busca o estudo do mundo e das pessoas, para uma melhor compreensão dos fenômenos sociais e identificação de lacunas que precisam de correções. As pesquisas descritivas são voltadas à descrição de características específicas de uma população, um fenômeno ou de uma experiência (Gil, 2008).

O presente trabalho abordou a necessidade de aprofundamento de alguns conteúdos durante o curso de agronomia, mediante o olhar dos alunos, através de suas perspectivas para o mercado de trabalho e área de afinidade. O estudo foi realizado no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) Campus Itapina, localizado na Cidade de Colatina - ES, Brasil. Os sujeitos de pesquisa foram os estudantes do 1º ao 10º período do curso de Agronomia do Ifes campus Itapina, cujo universo é caracterizado na Tabela 1.

Tabela 1- Quantidade de estudantes do curso de Agronomia do Ifes Campus Itapina, distribuídos por período

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Quantidade de alunos	29	10	30	9	32	2	3	47	6	20	188
% de Alunos	15,4	5,3	16	4,8	17	1,1	1,6	25	3,2	10,6	100
	20,7		20,8		18,1		26,6		13,8		

Fonte: Relatórios da Coordenadoria de Registros Acadêmicos do Ifes campus Itapina, 2024.

Os estudantes do curso de Agronomia se encontram matriculados de maneira relativamente homogênea nos três primeiros anos do curso, sendo perceptível uma elevação de estudantes nos sétimo e oitavo períodos. É importante ressaltar que o curso era ofertado com entrada no segundo semestre, o que foi alterado para o primeiro, por isso os anos correspondentes aos 1° a 6° apresentam mais alunos em períodos ímpares, que os pares nos anos finais. O perfil de renda dos estudantes do Ifes Itapina é apresentado na Tabela 2, que contém sua renda per capita. O

salário-mínimo brasileiro, à época da coleta de dados (2023) era de R$1320,00 mensais, equivalente a aproximadamente 242€ ou US$264,00.

Tabela 2 - Quantidade de estudantes do curso de Agronomia do Ifes Campus Itapina, distribuídos por renda per capita.

Renda Familiar per capita (RFP)	Número de alunos	% de alunos
0<RFP<=0,5	34	18,1
0,5<RFP<=1	64	34,0
1,0<RFP<=1,5	35	18,6
1,5<RFP<=2,5	24	12,8
2,5<RFP<=3,5	5	2,7
RFP>3,5	13	6,9
Não Declarada	13	6,9
Total	188	100

Fonte: Relatórios da Coordenadoria de Registros Acadêmicos do Ifes campus Itapina, 2024.

Os dados da Tabela 2 apontam que o perfil de renda dos estudantes de Agronomia do Ifes Campus Itapina é de vulnerabilidade socioeconômica, sendo o curso superior uma importante oportunidade para seu melhor posicionamento no mercado de trabalho e possibilidade de melhores condições de emprego e remuneração.

Os discentes participaram do estudo por meio de um formulário eletrônico, disponível no Google Forms®, no qual responderam perguntas sobre a formação do engenheiro agrônomo. O link de acesso foi disponibilizado por meio da plataforma de comunicação Whatsapp® e pelo sistema de controle institucional Q-Acadêmico®. Antes de ser veiculado, o projeto foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (CEP) do Ifes, mediante Parecer Consubstanciado 6.635.525, CAAE 74556323.3.0000.5072.

3. Resultados

Dos 188 alunos do curso de agronomia, 39 responderam ao questionário, representando uma amostra de 20,74% do total de estudantes. Desses alunos, o maior quantitativo foi do 3º período (28,2%, isto é, 11 alunos), seguidos de 25,6% do 10º período (10 alunos). Dos alunos respondentes, cerca de 46,2% (18 alunos) apresentam renda de 1 a 2 salários mínimos; 33,3% (13 alunos) indicam renda menor que 1 salário mínimo; e a renda dos demais (20,5%) é superior a 2 salários mínimos. Dachery et al. (2019) evidenciam que a baixa renda per capita estudantes das Ciências Agrárias está associada a uma baixa escolaridade, ressaltando a importância de políticas educacionais de qualidade para melhorar sua formação.

Os estudantes foram questionados sobre quais temas da sua formação agronômica consideram mais importantes, sendo solicitados que citassem pelo menos 3 disciplinas obrigatórias que já são lecionadas atualmente em seu curso e que consideram fundamentais para a formação do Engenheiro Agrônomo. Foram indicados pelos respondentes 31 componentes curriculares, que compunham sua matriz curricular, conforme apresentado na Figura 1.

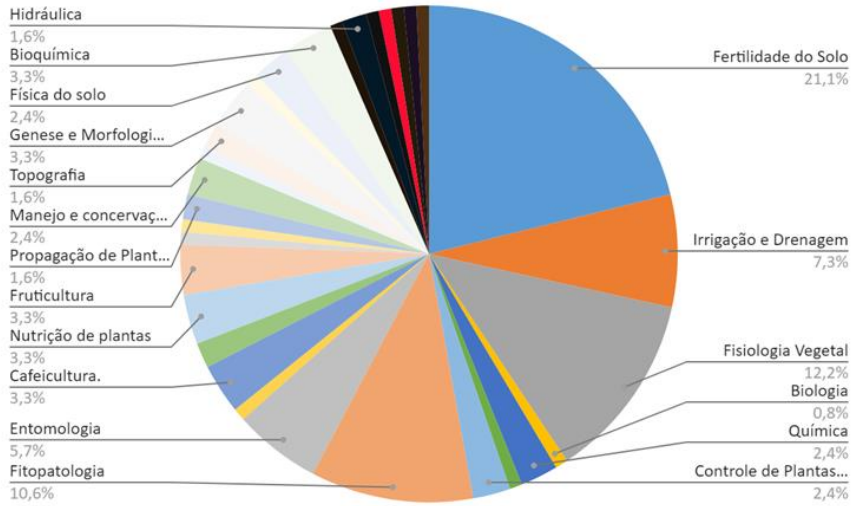


Figura 1. Temas da formação que os alunos de Agronomia do Ifes Itapina têm maior interesse e que compõem sua matriz curricular

Dos temas apontados pelos estudantes como mais relevantes para sua formação, cinco foram destaque:

- Fertilidade do solo (21,1%): Segundo Barros (2020), o estudo da fertilidade do solo é considerado de suma importância devido a quatro fatores: 1º aplicação de forma correta e em quantidade adequada de fertilizantes minerais; 2º sem esta aplicação as culturas podem esgotar suas próprias reservas e as do solo; 3º usada de forma errada a fertilidade do solo pode levar a diminuição da matéria orgânica presente no solo, que é usada para a retenção de água no solo e nutrientes; e 4º a aplicação de fertilizantes ajuda a não acontecer degradação em áreas de plantio, aumentando a oferta de alimentos.
- Fisiologia vegetal (12,2%): A fisiologia vegetal é uma subárea da botânica que fala sobre os mecanismos de absorção e transporte de nutrientes e água das plantas; metabolismo de reserva; biossíntese; desenvolvimento das plantas de acordo com seu habitat; germinação de sementes; além disso o que torna essa área ainda mais importante foram suas descobertas relacionadas a princípios ativos para fármacos e de utensílios usados no dia a dia de todos (SILVA, 2023).
- Fitopatologia (10,6%): A fitopatologia pode ser descrita como a ciência que estuda a relação entre o meio ambiente, as plantas e as doenças, determinando métodos de controle e prevenção dos mesmos, desde a sua diagnose, sintomatologia, etiologia e epidemiologia (CARROLO, 2016 e REIS, 2022). Ainda segundo Carrolo (2016), sendo este um processo entre planta

(hospedeiro) patógeno/agente causal (bactérias, fungos, etc), em uma relação íntima com o ambiente em que estão e tendo influência um sobre o outro ao mesmo tempo, esta relação pode resultar em modificações fisiológicas e morfológicas.

- Irrigação e drenagem (7,3%): De acordo com Ferreira (2011), a irrigação tem como principal objetivo prover água para plantas segundos suas necessidades, principalmente em áreas onde a chuva é pouquíssima para o desenvolvimento de forma adequada de cada cultura, sendo também de suma importância a observação da taxa de infiltração e absorção de água no solo.
- Entomologia (5,7%): A entomologia é a área da ciência que estuda os insetos, sendo os insetos o grupo de animais mais diversos do mundo, com cerca de 1,3 milhão de espécies descritas, representando 80% do reino animal (PEREIRA, 2021). Todos os ecossistemas do mundo, tanto aquáticos como terrestres possuem comunidades de insetos, por estes possuírem uma vasta gama de estilos de vida, formas e funções, levando a entomologia a estudar a relação entre insetos, humanos, animais e plantas (MATOS, 2009).

Esses 5 temas citados possuem maior porcentagem que os demais, em função de sua relação direta com a área técnica de Agronomia, por estarem diretamente relacionados ao solo, à água, às plantas e aos ataques que as culturas podem sofrer, e serem pontos chave no desenvolvimento e manejo das culturas. Destaca-se que, embora a pergunta fosse de natureza dissertativa, sem indução das respostas pelos pesquisadores, todos os respondentes a responderam de maneira coerente, indicando componentes curriculares que de fato compõem a matriz curricular de seu curso, o que pode indicar bom conhecimento dos conteúdos do curso por seus estudantes.

Em seguida, foram questionados sobre quais outros temas consideram importantes para a formação agronômica, devendo citar pelo menos três temas ou disciplinas que não são lecionadas atualmente em seu curso, mas que consideram fundamentais para a formação do Engenheiro Agrônomo. Foram citados 81 temas, que podem ser categorizados em 8 subáreas, as quais são apresentadas na Tabela 3. Foram citados alguns temas que já constam em conteúdos presentes no projeto de curso atual; estes foram suprimidos da Tabela 3, permanecendo apenas os temas indicados pelos participantes e que não constam em sua matriz curricular.

Tabela 3. Disciplinas de interesse dos alunos do curso de Agronomia que não compõem sua matriz curricular

SUBÁREA	DISCIPLINAS
Entomologia e Fitossanidade	Aplicação de defensivos
	Pragas e doenças de culturas perenes
	Acarologia agrícola
	Manejo integrado de pragas (MIP)
Ciências do Solo	Adubação
	Seleção de adubos
Melhoramento e Cultivo de Plantas	Café (Cafeicultura e Cafés especiais)
	Plantio de soja
	Cultivo de pimenta do reino
	Cultivo do cacau
	Produção e comercialização de mudas
	Fruticultura (cacau, abacaxi, coco)
	Cultivo protegido
	Plantas ornamentais
Tecnologia e Inovação	Programação
	Utilização de drones na agricultura
	Inteligência artificial no meio rural
	Tecnologia e inovação no agronegócio
	CAD (Desenho Assistido por Computador)
Economia e Gestão	Economia
	Finanças e Gerenciamento de custo/lucro
	Gestão de empresas
	Gestão agrícola
	Marketing
	Crédito rural
	Legislação, Direito tributário do agronegócio e Direito Rural
	Projetos e receituário agronômico
	Consultoria agronômica
	Planejamento da produção
	Metodologia de campo
Sustentabilidade	Sustentabilidade e Agricultura Orgânica
Relações Interpessoais	Relação interpessoal
Biotecnologia e Ciências Biológicas	Interações Planta-Microrganismos

Para Salles (2014), as principais áreas de atuação do engenheiro agrônomo são:

- Recursos naturais e manejo ambiental, onde apresentam os cuidados com solo, água, ar e biodiversidade;
- Produção vegetal, na qual apresentam, grãos, frutas, hortaliças e biomassa;
- Produção animal, bovinos, suínos, frangos, peixes, etc.;
- Biotecnologia, manipulação de genes para melhoramento animal e vegetal;
- Processamento de produtos agropecuários, embutidos, farinhas, etc;
- Engenharia de biossistemas, topografia, georreferenciamento, construções rurais, irrigação e drenagem, máquinas e equipamentos, etc;
- Administração, economia e sociologia rural, gestão de agronegócio, políticas agrícolas, direitos agrários, etc.

Nesse sentido, entende-se que os conteúdos apontados pelos estudantes se relacionam às áreas de atuação do profissional de Agronomia, demonstrando coerência de sua percepção quanto às atribuições do Agrônomo. Contudo, demonstra também pouco perfil inovativo, pois se trata principalmente de temas mais tradicionais e consolidados da atuação deste profissional.

Os participantes citaram também alguns cursos que já realizaram, além das disciplinas de sua graduação, para complementar sua formação. Dos 39 participantes, 17 fizeram cursos complementares. Alguns participaram de cursos regulares: Licenciatura em Ciências Agrícolas e em Química; Técnico em Agronegócio, em Zootecnia e em Agropecuária; Tecnologia em Saneamento Ambiental; Pós-graduação em Metodologias no ensino de ciências, em Fertilidade do Solo, e em Metodologia do Ensino de Química. Outros fizeram cursos de formação inicial e continuada: Programação com Python para automações e análises de dados; Inglês; Informática; Propriedade intelectual para startups; Poda de cacau; Produção de mudas; Produção de café; Produção de abóbora e melancia; Consultoria agrícola; Elaboração de CAR; Aplicação de defensivos; Cafés especiais; Planejamento da produção; Adubação e nutrição de café; Alimentação de gado de leite; Fertirrigacão; Manejo de pastagem; Recuperação de Áreas Degradadas; Auxiliar de Agroecologia; Ater - Assistência Técnica e Extensão Rural; EM - Microorganismos Eficientes; Fixação Biológica de Nitrogênio; Gestão em agronegócios; Identificação de ácaros; Líderes e lideranças do futuro; Piloto de drone; Classificação de café; Manutenção de drones; Energia Fotovoltaica; Programa Nacional de Crédito Fundiário - Terra Brasil; Florestas Plantadas; Negócio Certo Rural; Sustentabilidade na Produção do Café; Fertilidade dos Solos e Manejo de Adubação; Manejo de Irrigação; Cultivo do Cacau em Sistemas Sustentáveis. Destaca-se que, mesmo tendo perfil de vulnerabilidade socioeconômica, os estudantes buscam se capacitar para além da formação acadêmica proposta em sua matriz curricular, muitas vezes investindo recursos financeiros próprios para sua melhor formação em cursos tanto gratuitos quanto pagos.

Foi solicitado que os estudantes indicassem até 5 opções de disciplinas que consideram importante ter na formação agronômica obrigatória e não estão presentes em seu curso de Graduação, mediante 42 opções induzidas pelos pesquisadores, contendo temas tanto de característica técnica quanto de desenvolvimento pessoal, que atualmente não constam em sua matriz curricular obrigatória. As disciplinas que tiveram maior destaque foram: Aplicação de defensivos agrícolas, Acarologia agrícola e Crédito rural, que não estão presentes no projeto pedagógico do curso, mesmo na categoria optativas. Dentre as disciplinas que constam como optativas em seu projeto de curso, destacam-se: Agricultura de precisão, Nutrição mineral de plantas e Manejo de irrigação.

Grande parte das disciplinas apontadas se relaciona à crescente necessidade de integração dos profissionais da área agrícola aos conhecimentos em tecnologia aplicada, buscando conhecer e se atualizar para a atuação no mercado voltado à Agricultura 4.0 e 5.0. Destaca-se a preponderância de conteúdos relacionados à área técnica, isto é, os voltados ao desenvolvimento de *Hard Skills*. Contudo, também é possível observar a importância apresentada para conteúdos não-técnicos ou de desenvolvimento de Soft Skills, tais como: Liderança, Tomada de decisão e Inteligência emocional, fundamentais para o autodesenvolvimento profissional visando a atuação no mercado de trabalho.

Apesar disso, dos 39 participantes, cerca de 69,2% nunca ouviram falar sobre Soft Skills. Para Oliveira (2023), é fundamental compreender o conceito de Soft Skills para desenvolver habilidades não técnicas essenciais no ambiente profissional. O conhecimento sobre o tema permite aprimorar a comunicação, o trabalho em equipe e a inteligência emocional, contribuindo para o sucesso na carreira, sendo crucial para a melhoria da eficiência nos processos e a qualidade das interações no ambiente de trabalho. Em concordância, Ferreira (2024) ressalta que a importância de saber o que são as *Soft Skills* reside no fato de que essas habilidades são essenciais para o sucesso profissional e pessoal. Sua compreensão permite desenvolver competências interpessoais, como comunicação eficaz, liderança, empatia e trabalho em equipe, que são cada vez mais valorizadas no mercado de trabalho. Ter conhecimento sobre isso possibilita aprimorar essas habilidades, melhorar a interação com os outros e aumentar as chances de progresso na carreira. Os participantes do estudo corroboram com esses autores, ao responderem no formulário que consideram importante que as *Soft Skills* sejam trabalhadas na formação do Engenheiro Agrônomo: todos os que já ouviram falar sobre as *Soft Skills* responderam de forma positiva a esse questionamento, considerando importante que as mesmas sejam abordadas em sua formação profissional.

As *Soft Skills*, segundo Silva Neto (2010, p.3), devem ser ampliadas "ao longo da formação de um agrônomo, como por exemplo, a capacidade de contextualizar socialmente e de considerar o impacto ambiental das suas ações, a capacidade de interagir com os agricultores e, até mesmo, a sua competência técnica". De acordo com um dos alunos participantes, "*os agrônomos são muito limitados sobre o mercado de trabalho e não sabem lidar com as demandas externas, [...] assim como relações internacionais, mentalidade empreendedora, inteligência emocional e de liderança*" (PARTICIPANTE 12, 2024).

No trabalho diário os engenheiros agrônomos frequentemente trabalham em equipes, interagindo diretamente com os agricultores/clientes, colegas e outros profissionais (SOARES, 2023). Com isso, uma comunicação clara e concisa é essencial no momento da transmissão das informações técnicas, além de facilitar a colaboração e o trabalho em equipe (CORRÊA, 2023). Ao questionar os alunos a respeito dessas relações interpessoais, foi relatado que "*as soft skills são características e habilidades pessoais, que são essenciais para um bom desenvolvimento profissional. Como por exemplo, ter boa comunicação, empatia, saber lidar com conflitos, saber trabalhar em equipe, gestão de tempo, inteligência emocional. Essas habilidades são necessárias para que uma pessoa saiba lidar com conflitos e tenha um bom relacionamento interpessoal, tanto na graduação quanto no mercado de trabalho. Acredito que seja de suma importância trabalhar as soft skills, principalmente no início da graduação, para que o estudante se qualifique cada vez mais e desenvolva um bom networking, o que faz toda diferença para se instalar no mercado de trabalho*" (PARTICIPANTE 21, 2024).

De acordo com o Participante 8 "*Para um agrônomo essas habilidades são de suma importância, devido os diferentes tipos de pessoas envolvidas numa fazenda ou propriedade rural, ou seja um agrônomo tem que saber se portar diante desses diferentes tipos de pessoas*". Para o Participante 6, "*são importantes para definir as habilidades interpessoais do profissional e até ajudar o mesmo a se encontrar na profissão e escolher qual área da agronomia ele tem maior aptidão e deseja seguir.*"

Nesse sentido, as *soft skills* são essenciais para a Agronomia, visto que facilitam a comunicação eficaz e a colaboração com agricultores, clientes e colegas, bem como a otimização da aplicação de conhecimentos técnicos sobre a profissão, além da geração, implementação e difusão de tecnologias e inovação.

4. Discussão

A formação do profissional de Agronomia possui grandes desafios, dentre eles o aprimoramento curricular para melhor prepará-los para o mercado de trabalho. Ao

estruturar sua matriz curricular em consonância com as demandas do mercado e as exigências de perfil profissional, os cursos superiores de Agronomia tendem a proporcionar melhores condições de adaptação, crescimento, consolidação e destaque profissional de seus egressos. Nesse sentido, a abordagem integrada de temas afins a Hard Skills, Soft Skills e Tecnologias possibilita o desenvolvimento de profissionais mais preparados.

As Hard Skills, ou habilidades técnicas, são a base técnica da formação Agronômica, sendo o foco central da formação dos estudantes de Agronomia, sendo amplamente valorizadas tanto pelos alunos quanto pelo mercado de trabalho. Os resultados apontam que os temas mais relevantes para os estudantes envolvem fertilidade do solo, fisiologia vegetal, fitopatologia, irrigação e drenagem, e entomologia, todos componentes essenciais para a atuação técnica na profissão. Essas disciplinas estão diretamente relacionadas à produção agrícola, manejo de culturas e controle de pragas e doenças, demonstrando uma ênfase na capacitação tradicional do Engenheiro Agrônomo. Além disso, as disciplinas sugeridas pelos estudantes, como aplicação de defensivos agrícolas, acarologia agrícola e crédito rural, reforçam a necessidade de aprimoramento técnico, indicando que os alunos reconhecem lacunas em sua formação obrigatória. O interesse em cursos complementares, como programação para automação, classificação de café, manejo de irrigação e recuperação de áreas degradadas, mostra que os estudantes buscam se qualificar em áreas que complementam sua formação técnica e aumentam sua competitividade no mercado. Também foi possível identificar que os discentes sentem a necessidade de incluir disciplinas que são optativas como obrigatórias, além de disciplinas que não constam em seu projeto de curso para que sua formação seja mais completa e adaptada às necessidades de mercado.

A predominância de conteúdos técnicos reflete a necessidade de fortalecimento das competências agronômicas fundamentais, alinhadas às áreas de atuação do profissional, como manejo de recursos naturais, produção vegetal e animal, biotecnologia e engenharia de biossistemas. No entanto, a ausência de disciplinas obrigatórias relacionadas à inovação e ao empreendedorismo pode limitar a capacidade dos futuros profissionais de se adaptarem às transformações do setor.

Os resultados indicam que há uma crescente valorização da tecnologia aplicada à agricultura, especialmente com a expansão da Agricultura 4.0 e 5.0. A menção a temas como agricultura de precisão, nutrição mineral de plantas e manejo de irrigação destaca a necessidade de os profissionais se familiarizarem com novas ferramentas tecnológicas para otimização da produção. A busca por cursos como piloto e manutenção de drones, energia fotovoltaica e programação para automação mostra que os estudantes reconhecem a importância da digitalização e

do uso de tecnologias emergentes no campo. A utilização de sensores, inteligência artificial e big data na Agronomia é uma realidade crescente, e a formação acadêmica precisa acompanhar essa tendência para garantir que os profissionais estejam preparados para aplicar essas inovações de forma eficaz.

No entanto, embora a tecnologia seja vista como essencial para a modernização da agricultura, sua aplicação depende da capacitação técnica adequada e da integração entre conhecimento científico e prática profissional. A ausência de uma abordagem estruturada para o ensino de tecnologias digitais dentro da matriz curricular obrigatória pode dificultar a adaptação dos profissionais às demandas do setor.

Apesar da ênfase no desenvolvimento técnico, os resultados evidenciam uma lacuna significativa na formação dos estudantes em habilidades interpessoais e comportamentais (*Soft Skills*). A maioria dos participantes nunca haviam ouvido falar sobre *Soft Skills*, indicando um desconhecimento generalizado sobre a importância dessas competências para a atuação profissional. Os depoimentos dos estudantes revelam que habilidades como comunicação eficaz, liderança, inteligência emocional, trabalho em equipe e gestão de tempo são percebidas como essenciais para a atuação do Engenheiro Agrônomo, especialmente devido à necessidade de interação com agricultores, gestores e demais profissionais do setor. No entanto, a falta de disciplinas obrigatórias que abordem essas competências pode dificultar o desenvolvimento dessas habilidades ao longo da graduação.

Autores como Oliveira (2023) e Ferreira (2024) destacam que a compreensão e o aprimoramento das *Soft Skills* são fundamentais para o sucesso na carreira, permitindo uma melhor adaptação às exigências do mercado de trabalho. A necessidade de interação com diferentes *stakeholders* do setor agropecuário exige que o profissional possua habilidades de negociação, capacidade de resolução de conflitos e empatia, aspectos que não são tradicionalmente enfatizados na formação acadêmica em Agronomia.

A sugestão dos estudantes para a inclusão de disciplinas sobre liderança, tomada de decisão e inteligência emocional reforça a importância da formação integral do Engenheiro Agrônomo, preparando-o para desafios que vão além do conhecimento técnico. Como observado nos relatos dos participantes, um profissional que domina as *Soft Skills* pode atuar com mais eficiência na gestão de propriedades rurais, no atendimento a clientes e na implementação de inovações tecnológicas no campo.

Os resultados do estudo indicam que a formação do Engenheiro Agrônomo ainda é predominantemente técnica, mas há uma crescente percepção da necessidade de incorporar habilidades interpessoais e conhecimentos tecnológicos na matriz

curricular. Para garantir um profissional mais completo e preparado para os desafios do mercado de trabalho, é essencial que a formação acadêmica inclua uma abordagem mais equilibrada entre *Hard Skills, Soft Skills* e Tecnologia.

A integração dessas competências pode ser feita por meio de disciplinas multidisciplinares, que combinem conhecimentos técnicos com habilidades de comunicação, liderança e gestão; projetos práticos e experiências de campo, que estimulem a aplicação da tecnologia e o desenvolvimento de competências interpessoais, em que se destacam as Metodologias Ativas de Ensino (como a Aprendizagem Baseada em Problemas); parcerias com empresas e instituições do setor agropecuário, possibilitando que os estudantes tenham contato direto com as demandas do mercado; capacitações extracurriculares e cursos de curta duração, voltados para inovação, empreendedorismo e digitalização da agricultura.

Ao adotar uma formação mais ampla, que contemple tanto competências técnicas quanto comportamentais e tecnológicas, o curso de Agronomia poderá formar profissionais mais qualificados, inovadores e preparados para enfrentar os desafios do setor agropecuário contemporâneo.

5. Conclusões

O estudo apresenta diversos temas identificados como importantes pelos estudantes do curso de Agronomia do Ifes campus Itapina, para sua formação como Engenheiros Agrônomos, que deve ir além das competências técnicas tradicionais, integrando *Hard Skills, Soft Skills* e Tecnologia para atender às demandas do setor agropecuário. Os resultados deste estudo evidenciam que os estudantes reconhecem a importância de disciplinas técnicas voltadas ao solo, água, plantas e pragas, reforçando a necessidade de aprofundamento em áreas essenciais para o exercício profissional. Além disso, há uma crescente valorização da Tecnologia na Agricultura, indicando que a formação deve acompanhar a transição para a Agricultura 4.0 e 5.0.

Conteúdos relacionados ao desenvolvimento de competências técnicas ou Hard Skills são apontadas neste estudo como mais relevantes para a formação do Engenheiro Agrônomo, de acordo com a percepção dos estudantes. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que a maior parte dos estudantes demonstrou desconhecer o conceito de *Soft Skills*, não tendo, portanto, uma visão mais complexa da formação do profissional, que envolve o desenvolvimento de habilidades não-técnicas para sua atuação no mercado de trabalho. A pesquisa também revelou uma lacuna significativa no desenvolvimento de *Soft Skills*, fundamentais para a comunicação eficaz, liderança e resolução de problemas. O desconhecimento

generalizado sobre essas habilidades pode impactar negativamente a inserção e o desempenho profissional dos futuros agrônomos, especialmente em um mercado cada vez mais dinâmico e colaborativo.

Desse modo, conclui-se que as reformulações do currículo dos cursos de Agronomia devem acompanhar as demandas de mercado, cuja exigência cada vez maior de habilidades tanto técnicas quanto tecnológicas e interpessoais impõe a seus profissionais uma necessidade constante de formação e capacitação. Assim, torna-se essencial que a matriz curricular dos cursos de Agronomia contemple não apenas disciplinas técnicas, mas também oportunidades para o desenvolvimento de habilidades interpessoais e de inovação. A implementação de abordagens multidisciplinares, projetos práticos e parcerias institucionais pode contribuir para a formação de profissionais mais completos e preparados para os desafios do setor agropecuário. Dessa forma, a integração equilibrada entre *Hard Skills, Soft Skills* e Tecnologia permitirá a capacitação de engenheiros agrônomos mais aptos a atuar de forma inovadora, sustentável e eficiente no mercado de trabalho.

Contribuições dos Autores: Conceitualização, DSD; metodologia, LHSV, DSD; análise formal, DSD, LHSV; validação LHSV, RMGM, JCOJ; investigação, DSD; curadoria de dados, DSD; redação – preparação do rascunho original, LHSV; redação – revisão e edição, RMGM, JCOJ; supervisão, LHSV, RMGM. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu financiamento externo

Declaração do Comitê de Ética Institucional: O estudo foi conduzido de acordo com as diretrizes da Declaração de Helsinque e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Instituto Federal do Espírito Santo (74556323.3.0000.5072, 05/02/2024).

Declaração de Consentimento Informado: O consentimento informado foi obtido de todos os participantes envolvidos no estudo.

Declaração de Disponibilidade de Dados: Os dados coletados, que sustentam os resultados relatados, se encontram em posse dos pesquisadores, não havendo dados arquivados publicamente.

Agradecimentos: Instituto Federal do Espírito Santo campus Itapina.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALEXANDRE, L. do V. B. O que é o curso de Agronomia? 2022. Disponível em: https://univale.br/o-que-e-o-curso-de-agronomia/. Acesso em: 07 abr. 2024.
2. MAZOYER, M.; ROUDART, L. História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea. Tradução de Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira]. São Paulo: UNESP, 2010. MINUCIO, L. F. Mapeamento com drones: guia completo. Futurite, 2021.
3. MELO, R.C. de. A HISTÓRIA DA AGRONOMIA NO BRASIL: UMA BREVE ANÁLISE. 2020. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Docência no Ensino Superior., Instituto Federal Goiano, Ipamer, 2020. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/1309/4/tcc_Ricardo%20Carvalho%20de%20Melo.pdf. Acesso em: 27 maio 2024.
4. ROSA, E. J.; LEAL, I.L. Uma breve sinópse: história da agronomia no Brasil. 2016.

5. PARCHEN, Carlos Augusto. O EXERCÍCIO PROFISSIONAL DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS. Revista Acadêmica Ciência Animal, Curitiba, v.5, n.1, p.85-90, jan. 2007. Disponível em: file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/O_EXERCICIO_PROFISSIONAL_DE_CIEN CIAS_AGRARIAS.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.
6. PRIEBE, D.C.; TEIXEIRA, E.D. Percepção dos egressos do Bacharelado em Administração sobre a contribuição da metodologia FOIL na atuação profissional. Saber Humano: Revista Científica da Faculdade Antonio Meneghetti, v.12, n.21, p.96-123, 2022.Disponível em: https://saberhumano.emnuvens.com.br/sh/artic le/view/552. Acesso em: 28/05/2024.
7. FERNANDES SOUZA, J.M. et al. HORTAS COMUNITÁRIAS E O ENSINO 5.0: IMPORTÂNCIA DAS SOFT SKILLS NA EXTENSÃO. Anais do Seminário de Atualização de Práticas Docentes, [S. l.], v. 5, n. 1, 2023. Disponível em: https://an ais.unievangelica.edu.br/index.php/praticasdocentes/article/view/9498. Acesso em: 27 maio. 2024.
8. FIA. Soft Skills: O que são, Tipos Principais e Como Desenvolver. Disponível em: https://fia.com.br/blog/soft-skills/. Acesso em: 13 jun. 2023.
9. GIBBS, G. Analise de dados estatísticos. 2009. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=t1TWL4__w4cC&oi=fnd&pg=PA7&dq=Pesquisa+qualitativa&ots=G5bUs-abpD&sig=6DVT_h3PCK98T7PVPZvZp6QRxp4#v=onepage&q=Pesquisa%20qualitativa&f=false. Acesso em: 14 jun. 2023.
10. GIL, A.C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
11. DACHERY, C. S. et al. A RELAÇÃO ENTRE RENDA E ESCOLARIDADE DOS ESTUDANTES DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. 2019. Congresso de Ensino de Graduação. Disponível em: https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2019/CA_03811.pdf. Acesso em: 28 maio 2024.
12. BARROS, José. Fertilidade do solo e Nutrição das plantas. 2020.Disponível em: https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/28120 . Acesso em: 28/05/2024.
13. SILVA, J. et al. O ensino de fisiologia vegetal: Uma revisão sistemática durante a pandemia da Covid 2019. Diversitas Journal, v.8, n.3, 2023. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/download/2653/2 188/16879. Acesso em : 28/05/2024.
14. CAROLLO, E. M.; FILHO, H. P. S. Manual Básico de Técnicas Fitopatológicas. 1a Edição ed. Cruz da Almas-BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2016.Disponível em : https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infote ca/handle/doc/1054670. Acesso em : 28/05/2024.
15. REIS, E.M. et al. Sobre os danos causados pela ferrugem asiática da soja. Summa Phytopathologica, v.48, p.53-54, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/s p/a/WC4PKfScZrzfpgf8BFRhSsQ/?lang=pt. Acesso em : 28/05/2024.
16. FERREIRA, V.M. Irrigação e drenagem. Colégio Agrícola de Floriano, órgão vinculado à Universidade Federal do Piauí (UFPI). Piauí , 2011. Disponível em : https://www.academia.edu/download/39791967/Irrigacao_e_Drenagem_2.pdf. Acesso em: 28/05/2024.
17. PEREIRA, R. C. et al. Coleções entomológicas na pesquisa, ensino e extensão: um relato sobre o museu de entomologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2021. Disponível em : https://downloads.editoracie ntifica.org/articles/210705507.pdf. Acesso em: 28/05/2024.
18. MATOS, C.H.C. et al. Utilização de modelos didáticos no ensino de entomologia. Revista de biologia e ciências da terra, v.9, n.1, p.19-23, 2009. Disponível em : https://www.redalyc.org/pdf/500/50016921003.pdf. Acesso em : 28/05/2024.
19. SALLES, M. Agronomia: a ciência da terra. 2014. Disponível em: https://globorura l.globo.com/Noticias/noticia/2014/10/agronomia-ciencia-da-terra.html . Acesso em: 28 maio 2024.
20. OLIVEIRA, G.K.S. de. Visão dos estudantes de enfermagem acerca das SOFT SKILLS inerentes à formação do futuro enfermeiro. 2023. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/28987/GENILS A%20KEROLAINE%20SANTOS%20DE%20OLIVEIRA%20-%20TCC%20BACHARELADO%20EM%20ENFERMAGEM%20CES%202023.pdf?sequence=1&isAllo wed=y. Acesso em: 28 maio 2024.

21. FERREIRA, G.V. Avaliação das Soft skills à luz da teoria dos traços de personalidade: um estudo de caso múltiplos na área comercial de empresas da região metropolitana de São Paulo. 2024. TCC (Graduação) - Curso de Administração, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/56092 . Acesso em: 28 maio 2024.
22. SILVA NETO, B. Por uma agronomia como ciência da complexidade: o papel da disciplina de Extensão Rural. Seminário Nacional de Ensino em, 2010. Disponível em: Por uma Agronomia como uma ciência da complexidade, o papel da disciplina de Extensão Rural.pdf (beneweb.com.br). Acesso em: 28 maio 2024.
23. SOARES, B.P. Acesso às tecnologias de informação e comunicação na agricultura e produção de conteúdo informativo digital voltado para produtores rurais. 2023. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/263316. Acesso em: 28 maio 2024.
24. CORRÊA, T. Comunicação efetiva no local de trabalho: a importância da comunicação clara e concisa para o sucesso da equipe. 2023. Blog ploomes. Disponível em: https://blog.ploomes.com/comunicacao-efetiva/. Acesso em: 28 maio 2024.

La irrupción de la IA en la docencia: necesidades de los egresados, metodologías docentes y de evaluación en Ingeniería Agroforestal

Andrés Almeida [1], Fernando Aragón [2], María Rosario Castro [3], María Dolores Fernández [4], Almudena García [5], María Dolores Gómez [6], Penélope Gutiérrez [7], Silvia Martínez [6], Fernando R. Mazarrón [1], Coral Ortiz [7], Araceli Peña [8], Alicia Perdigones [1]*, Iván Herranz-Matey [1], Carmen Rocamora [2], Ramiro Rodríguez [4], José Vicente Turégano [7] y Diego Valera [8]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Agroforestal; af.almeida@upm.es; f.ruiz@upm.es; alicia.perdigones@upm.es; ivan.hmatey@upm.es

[2] Universidad Miguel Hernández, Departamento de Ingeniería; f.aragon@umh.es, rocamora@umh.es

[3] Universidad de León, Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias; mrcasa@unileon.es

[4] Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Ingeniería Agroforestal; mdolores.fernandez@usc.es; manuelramiro.rodriguez@usc.es

[5] Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; almudena@unavarra.es

[6] Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Agronómica; lola.gomez@upct.es; silvia.martinez@upct.es

[7] Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria; pgutierr@upvnet.upv.es; cortiz@dmta.upv.es; jturegan@agf.upv.es

[8] Universidad de Almería, Departamento de Ingeniería; apfernan@ual.es; dvalera@ual.es

* Correspondence: alicia.perdigones@upm.es

Abstract: A medida que la inteligencia artificial (IA) se introduce en el panorama educativo, su influencia en la enseñanza universitaria es cada vez mayor. Los profesores tenemos la responsabilidad de reorientar la docencia para que nuestros egresados estén preparados para este nuevo mundo profesional. Los coautores de este trabajo, de ocho universidades españolas, colaboran en un proyecto de innovación educativa, iniciando una serie de actividades formativas en esta temática. Se han diseñado un conjunto de clases y otros contenidos sobre IA que están disponibles en un repositorio en Moodle. La IA también puede forzar una revisión de los sistemas de evaluación, analizando el uso, cuando sea posible, de técnicas alternativas, como los exámenes orales. El objetivo final es la formación de los alumnos: se deben aprovechar las posibilidades de la IA para mejorar el proceso de aprendizaje, y a la vez preparar a nuestros egresados para un mundo profesional en el que trabajarán con IA.

Keywords: Inteligencia artificial; sistemas de evaluación; competencias digitales

1. Introducción

La aparición de la inteligencia artificial (IA) ha generado un cambio en la formación de nuestros egresados de ingeniería agroforestal, y en la manera en que se enseña y evalúa a los estudiantes. La transformación digital en la docencia universitaria se ha visto acelerada por herramientas basadas en IA; en este contexto, resulta imprescindible analizar las implicaciones y consecuencias de esta situación en nuestra docencia.

Este estudio analiza el impacto de la IA en la docencia universitaria desde tres dimensiones fundamentales: (1) las competencias que requieren los egresados en un mundo laboral digitalizado, (2) la adaptación de las metodologías docentes para integrar eficazmente la IA en los procesos de enseñanza y aprendizaje, y (3) el rediseño de las estrategias de evaluación para garantizar la adquisición de conocimientos y habilidades en un contexto donde la IA puede ser utilizada por los estudiantes.

En el estudio colaboran profesores de las siguientes universidades: Universidad de Almería, Universidad de León, Universidad de Santiago de Compostela, Universidad Miguel Hernández, Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Politécnica de Valencia y Universidad Pública de Navarra.

La IA generativa se refiere a tecnologías capaces de producir texto, imágenes u otro contenido a partir de datos de entrada, lo que ofrece nuevas posibilidades para la educación personalizada. En el aula, la IA se está utilizando para diversas funciones, como la creación de contenido, la retroalimentación e incluso el diseño de itinerarios de aprendizaje individualizados. Las herramientas basadas en IA pueden generar exámenes, ofrecer retroalimentación instantánea sobre el rendimiento del alumnado y ayudar a adaptar la instrucción a sus necesidades. Estas herramientas representan una transición de los métodos de enseñanza tradicionales a entornos de aprendizaje adaptativos basados en datos que priorizan la participación y el rendimiento del alumnado.

El auge de la IA generativa en la educación ha sido significativo, y diversos estudios y revisiones destacan sus posibles beneficios y desafíos (AL-Smadi, 2023; Bahroun et al., 2023; Bobula, 2024; Bozkurt, 2023; Yan et al., 2023). Una de las áreas clave de enfoque es el uso de la IA generativa en la analítica del aprendizaje, donde puede desempeñar un papel fundamental en el análisis de datos no estructurados, la generación de datos sintéticos del alumno, el enriquecimiento de las interacciones multimodales del alumno y las intervenciones adaptativas (Yan et al., 2023). Sin embargo, también existe preocupación por los posibles riesgos y desafíos asociados

con la integración de la IA generativa en la educación, como la necesidad de modelos transparentes, la corrección de sesgos y el uso responsable de la tecnología (Bahroun et al., 2023).

La IA generativa ya se ha explorado en diversos contextos educativos, como la educación médica y la educación en ingeniería. Por ejemplo, un estudio sobre el uso de ChatGPT en la educación médica indicó que puede utilizarse para generar materiales de aprendizaje personalizados en este campo. Además, puede proporcionar retroalimentación en tiempo real y apoyar la evaluación del estudiante (Bahroun et al., 2023). Otro estudio sobre el uso de la IA generativa en la formación en ingeniería reveló que puede utilizarse para crear materiales de aprendizaje interactivos y atractivos, fomentar la colaboración estudiantil y mejorar los resultados académicos (Bahroun et al., 2023).

A pesar de sus posibles beneficios, también existe preocupación por el impacto de la IA generativa en la enseñanza y el aprendizaje, incluyendo la posibilidad de distracción, la necesidad de formación del profesorado y la posibilidad de sesgo (Bozkurt, 2023). Sin embargo, un estudio sobre el uso de la IA generativa en la educación superior reveló que también puede tener un impacto positivo en las actitudes y percepciones de los estudiantes hacia el uso de la IA en el aprendizaje académico (Kurtz et al., 2024).

Uno de los desafíos más importantes para la integridad académica en las evaluaciones impulsadas por IA es la posibilidad de que el contenido generado por IA se utilice como sustituto del trabajo del estudiante (Farrelly y Baker, 2023). Esto puede generar inquietudes sobre mala conducta académica, en particular plagios, y la erosión de habilidades cognitivas esenciales debido a la excesiva dependencia del contenido generado por IA (Wirzal et al., 2024). Por ejemplo, el uso de herramientas de IA para generar trabajos académicos puede socavar el valor del trabajo académico y comprometer la integridad del proceso educativo (Bozkurt, 2024).

Otro desafío es la fiabilidad de las herramientas de detección de IA para identificar contenido generado por IA, ya que estas herramientas no siempre son eficaces y pueden dar lugar a acusaciones falsas contra los estudiantes (Farrelly y Baker, 2023).

Además, la falta de contexto y las limitaciones creativas del contenido generado por IA pueden dificultar que los estudiantes comprendan el razonamiento detrás de los resultados de IA, y que no evalúen críticamente su validez (Farrelly y Baker, 2023).

Para abordar estos desafíos, es esencial desarrollar métodos de evaluación robustos que incorporen herramientas de IA de forma transparente, bien definida

y alineada con los objetivos educativos (Ardito, 2023). Esto puede implicar el uso de herramientas de IA como complemento al trabajo del estudiante, en lugar de como un sustituto, y garantizar que los estudiantes comprendan las limitaciones y los sesgos del contenido generado por IA (Miao et al., 2023a). Asimismo, promover la evaluación crítica del contenido generado por IA por parte de los estudiantes y proporcionar directrices claras para el uso responsable de las herramientas de IA puede ayudar a mantener la integridad académica en las evaluaciones basadas en IA (Miao et al., 2023a).

Asimismo, se pueden explorar métodos de evaluación alternativos, como exámenes orales y tareas basadas en proyectos, para mitigar el posible uso indebido de la IA (Jiao et al., 2024). Estos métodos pueden ayudar a garantizar que los estudiantes desarrollen las habilidades necesarias para evaluar el contenido generado por IA (Ardito, 2023). Finalmente, fomentar un entorno caracterizado por la transparencia y el uso ético de la IA, mejorar los sistemas de revisión con tecnología adaptada para identificar el plagio generado por IA y promover estándares éticos más estrictos en toda la comunidad académica puede ayudar a abordar los desafíos de la IA (Miao et al., 2023a).

En general, el auge de la IA generativa en la educación tiene el potencial de transformar la enseñanza y el aprendizaje, pero también requiere una cuidadosa consideración de los desafíos y las oportunidades que presenta (AL-Smadi, 2023; Bobula, 2024; Yan et al., 2023). Se necesita más investigación para explorar el potencial de la IA generativa en la educación y abordar las preocupaciones y los desafíos asociados con su integración (Bahroun et al., 2023).

2. Necesidades de los egresados en la era de la IA

El mercado laboral está en constante evolución y demanda profesionales con habilidades adaptativas que puedan interactuar con sistemas de IA. Muchos expertos indican que los futuros profesionales, aunque se apoyarán en IAs, no podrán tener una formación inferior a la actual; probablemente necesitarán una formación más completa (y diferente) porque tendrán que dirigir, gestionar y supervisar el trabajo de IAs a su cargo. Por lo tanto, los docentes universitarios tenemos la responsabilidad de reorientar la docencia para que nuestros egresados estén preparados para este nuevo mundo laboral. Competencias clásicas que se ven afectadas son:

- Pensamiento crítico y resolución de problemas: La capacidad de analizar, interpretar y tomar decisiones fundamentadas en un contexto donde la IA proporciona información y recomendaciones automatizadas. El pensamiento crítico es clave para supervisar información o decisiones provenientes de IAs.

- Competencias digitales y alfabetización en IA: Comprender el funcionamiento básico de los modelos de IA para saber cuándo es conveniente usar IA (y cuándo no), y para interactuar con la IA sin errores.

- Optimización del tiempo de trabajo: nuestros egresados deben saber cómo utilizar las IAs (y cómo gestionar y repartir sus propias actividades y tareas) de forma que consigan ser unos profesionales más eficientes en el uso del tiempo de trabajo.

Un aspecto que hay que señalar es que los alumnos empiezan a demandar formación sobre IA. Las titulaciones que no incluyan contenidos en este tema pueden comenzar a tener una imagen de titulaciones no actualizadas u obsoletas, por lo que los docentes de ingeniería agroforestal deberíamos organizarnos para incluir en nuestros planes de estudio aprendizaje sobre este tema. Parece indudable que nuestros egresados trabajarán con IA y los docentes debemos formales para que lo hagan con eficacia.

En este sentido, en el ámbito del proyecto de innovación educativa "Adaptación del proceso de enseñanza-aprendizaje a la incorporación de la Inteligencia Artificial en la docencia universitaria", ocho universidades españolas, de titulaciones relacionadas con la ingeniería agroforestal (mencionadas al inicio), están colaborando en generar contenido formativo sobre IA. Algunas de las actividades resultantes han sido:

- Diseño de un conjunto de clases para impartir las bases teóricas de la IA, y su uso práctico con algunos de los programas de aplicación en determinados ámbitos. El conjunto de clases que se han preparado incluye las bases teóricas, criterios para diseñar los prompts, aplicaciones en generación de texto, imágenes y presentaciones, aplicaciones en mejora y renderizado de imágenes, normativa, y ética en el uso de IA.
- Creación de un repositorio en Moodle donde se almacenan los materiales docentes y los links a las aplicaciones.
- Actividades de divulgación para mostrar la incorporación de la IA en la docencia universitaria: charlas en colegios, publicaciones en los medios de la universidad. En la ETSI Agronómica de Madrid se ha dedicado un número de la revista de la escuela a las actividades de formación con IA (Figura 1).

3. Metodologías docentes para la integración de la IA

La incorporación de la IA en la docencia universitaria requiere una adaptación de las estrategias pedagógicas tradicionales. Hay menos hay dos desafíos: el primero, adaptar las metodologías clásicas para una integración efectiva de las competencias que hemos mencionado, de forma que el egresado sepa trabajar con IA; y el segundo, utilizar como docentes la IA para que también nuestro propio trabajo sea mejor y más eficiente. En este apartado analizamos este segundo aspecto.

SAVIA

BOLETÍN DE LA ETSIAAB Nº 37 - Marzo 2025

La Inteligencia Artificial en la formación de los ingenieros del área agroforestal

La ETSIAAB a la vanguardia en la integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la formación agroforestal.

En noviembre finalizó el proyecto de innovación educativa, **'Inteligencia artificial para la mejora de los ODS en la docencia: ODS-IA'***, donde se introdujeron herramientas de IA tanto en el aula, como fuera de ella, en diferentes asignaturas técnicas de los Grados en Ingeniería Alimentaria e Ingeniería Agrícola, vinculándolas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Además de las actividades realizadas en el aula, se organizaron talleres para estudiantes de los últimos cursos de los Grados en Ingeniería Agrícola, Alimentaria y Agroambiental, como actividad dentro del Pasaporte ETSIAAB; participó también alumnado de otros Centros y titulaciones de Máster. También hubo interés por parte del personal de la Escuela y otros Centros, aunque no fue posible ampliar plazas en ese momento. Esta línea de trabajo continúa en el marco de otro proyecto concedido recientemente, **'Adaptación del proceso de enseñanza-aprendizaje a la incorporación de la Inteligencia Artificial en la docencia universitaria'***.

Dentro del proyecto actual se van a implementar sistemas de evaluación que permitan evaluar los conocimientos adquiridos por parte del alumnado sabiendo, porque se les permite, que utilizan diferentes IA generativas.

Son proyectos interuniversitarios con la participación de ocho universidades españolas cuyos docentes imparten asignaturas del Área Agroforestal. Su objetivo es crear una red de profesores con inquietud sobre cómo introducir las nuevas tecnologías en el aula compartiendo los retos y las oportunidades que nos brindan estas nuevas herramientas.

Las universidades participantes son: Universidad de León, Universidad de Almería, Universidad Pública de Navarra, Universidad de Santiago de Compostela, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Miguel Hernández de Elche y la Universidad Politécnica de Madrid, que coordina el proyecto. La colaboración está abierta a otros docentes y otras universidades.

Desde la Escuela, participan dos Grupos de Innovación Educativa: GIE en Proyectos de Ingeniería (GIE-Project) y el GIE en Tecnologías eléctricas y automática de la ingeniería rural (IE-TEA).

** Proyectos financiados a través de la convocatoria anual de Proyectos de Innovación Educativa y Mejora de la Calidad de la Enseñanza del Servicio de Innovación Educativa de la UPM.*

Taller de Inteligencia Artificial en la ETSIAAB

Herramientas generativas de IA utilizadas

Las herramientas que se han estado utilizando incluyen aquellas que generan texto (ChatGPT, Gemini, Bing, Claude), las que generan imágenes (Bing, Gemini), generan presentaciones (Gamma app, Slidesgo), resumen archivos pdf (Chatpdf ai, PDF ai), ayudan en la investigación (Consensus ai, Perplexity ai), o mejoran los renderizados de modelos 3D (LookX ai, Prome ai), entre otras. Se activa un perfil en Instagram (@aula.ingeniería) donde se incorpora, a modo de tutoriales, el manejo y posibilidades de estas herramientas, además de servir como espacio complementario a la docencia del área de la ingeniería eléctrica y maquinaria del área agroforestal. En todos los casos, se ha utilizado la versión gratuita que ofrecen todas ellas, que permite su uso a través de un simple registro o a través de una cuenta de correo. En este tipo de aplicaciones el uso permitido es limitado bien por cantidad de usos (generaciones) o bien por

Pasa a la página siguiente

Figura 1. Número de la revista de la ETSI Agronómica de Madrid de marzo 2025 para la divulgación de las actividades de formación con IA.

Respecto a este segundo desafío, resulta también un reto que los profesores utilicemos IA para mejorar nuestra docencia:

- Mejorando nuestra propia capacidad de búsqueda de información y de actualización de las asignaturas.
- Mejorando la calidad de nuestros materiales docentes con IA.
- Automatizando la corrección de determinados ejercicios y test.
- Generando simulaciones y laboratorios virtuales con IA; creando entornos simulados donde los estudiantes puedan experimentar escenarios reales con asistencia de IA.

La IA en la educación a menudo implica la recopilación y el análisis de una amplia gama de datos personales sobre los estudiantes, incluyendo puntajes de exámenes, calificaciones y otras métricas de rendimiento. Estos datos pueden utilizarse para monitorear el progreso de los estudiantes, identificar áreas de debilidad y brindar apoyo y recursos personalizados. Sin embargo, la recopilación y el análisis de datos personales también plantean algunas preocupaciones sobre la privacidad y la posibilidad de que los datos de los estudiantes sean utilizados de maneras que no autorizan (Baskara, 2023).

Para abordar las preocupaciones sobre la recopilación y el uso de datos personales en la educación, es fundamental contar con políticas claras y transparentes que protejan la privacidad de los estudiantes y les otorguen control sobre sus datos. Esto puede implicar exigir el consentimiento explícito antes de recopilar o utilizar los datos de los estudiantes y ser transparentes sobre su uso. Al adoptar estas medidas, podemos mitigar los riesgos asociados al uso de la IA en la educación y garantizar que se utilice de forma ética y responsable (Baskara, 2023).

Los algoritmos de IA pueden presentar sesgos si se entrenan con datos no representativos de la población o si se diseñan de forma que discriminen a ciertos grupos de personas. Esto puede generar resultados injustos o desigualdades en la educación, ya que los sistemas de IA sesgados pueden tomar decisiones o recomendaciones injustas. Es fundamental garantizar que los sistemas de IA se diseñen e implementen para minimizar los sesgos y promover la justicia y la equidad en la educación (Baskara, 2023).

4. Estrategias de evaluación en la era de la IA

En los últimos años han aumentado las situaciones en nuestras universidades en las que los estudiantes realizan fraudes en las evaluaciones, apoyados tanto en nuevas herramientas digitales como en aplicaciones de IA. Tenemos la responsabilidad de controlar estas situaciones.

Como en apartados anteriores, el conjunto de profesores implicado en este estudio ya tiene algunas experiencias en las estrategias de evaluación. Por ejemplo, algunos profesores sugieren la vuelta (en entornos donde sea posible) de las opciones de evaluación con examen oral, y se están probando otras iniciativas. Resulta de gran interés poner en común y evaluar las ventajas e inconvenientes de todas las experiencias que se están realizando en el conjunto de nuestro profesorado de agroingeniería. El desafío de la integridad académica en las evaluaciones impulsadas por IA es una preocupación apremiante en la era de los rápidos avances tecnológicos (Miao et al., 2023b).

La evaluación del aprendizaje debe adaptarse a un contexto donde los estudiantes pueden utilizar herramientas de IA para generar respuestas automáticamente. Como docentes, debemos revisar nuestras estrategias de evaluación para garantizar que los estudiantes han adquirido las competencias y resultados de aprendizaje convencionales, asociados a nuestras titulaciones, y adicionalmente garantizar sus habilidades en las nuevas temáticas relacionadas con las IAs.

Uno de los desafíos más importantes es la dificultad para distinguir entre el trabajo original y el contenido creado por IA, lo que plantea dificultades a las instituciones académicas para mantener la honestidad académica (Khatri y Karki, 2023). Para abordar estos desafíos, se han propuesto diversas estrategias, entre ellas la adopción de sofisticados sistemas de detección de plagio basados en IA (Miao et al., 2023b, Kholod y Momot, 2024).

En definitiva, las instituciones pueden considerar la implementación de métodos de evaluación alternativos menos susceptibles al plagio basado en IA, como exámenes orales y tareas basadas en proyectos colaborativos (Tan et al., 2024). Estos métodos pueden proporcionar una evaluación más integral de los conocimientos y habilidades del estudiante y ser menos vulnerables a los riesgos de plagio basado en IA. Por último, las instituciones también pueden considerar implementar una combinación de estas estrategias, como usar herramientas de detección y proporcionar pautas claras, para crear un sistema sólido para salvaguardar la integridad académica en las evaluaciones impulsadas por IA (Miao et al., 2023a).

5. Conclusiones

A medida que la IA generativa continúa modificando el panorama educativo, su influencia en la enseñanza universitaria es crucial. Si bien las herramientas de IA ofrecen un inmenso potencial para mejorar el aprendizaje y la evaluación, también presentan importantes desafíos para la equidad, la transparencia y la preservación de los estándares académicos. Al final, el objetivo es claramente la formación del alumno: nuestra obligación es conseguir que esta formación sea mejor en este entorno con IA, consiguiendo que el futuro profesional sepa utilizar esta herramienta para ser más eficiente, y utilizando la IA para que la formación sea más personalizada y la evaluación más justa y eficiente (y para que, en la medida de lo posible, optimice nuestro tiempo como docentes). Al mismo tiempo, hay que evitar riesgos evidentes; entregas rutinarias de trabajos realizados con IA y otros tipos de fraudes académicos. Los profesores debemos abordar con motivación la adaptación de nuestra docencia a estas nuevas circunstancias, para conseguir unos egresados aún mejor preparados.

Referencias

1. Al-Smadi, M. ChatGPT and Beyond: The Generative AI Revolution in Education. ArXiv 2023, abs/2311.15198.
2. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265456119
3. Ardito, C. G. Contra generative AI detection in higher education assessments. ArXiv 2023, abs/2312.05241. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266149511
4. Bahroun, Z.; Anane, C.; Ahmed, V.; Zacca, A. Transforming Education: A Comprehensive Review of Generative Artificial Intelligence in Educational Settings through Bibliometric and Content Analysis. Sustainability 2023, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261379971
5. Baskara, R. Personalised learning with AI: implications for Ignatian pedagogy. International Journal of Educational Best Practices 2023, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:258503093
6. Bobula, M. Generative artificial intelligence (AI) in higher education: a comprehensive review of challenges, opportunities, and implications. Journal of Learning Development in Higher Education 2024, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:268755493
7. Bozkurt, A. Unleashing the Potential of Generative AI, Conversational Agents and Chatbots in Educational Praxis: A Systematic Review and Bibliometric Analysis of GenAI in Education. Open Praxis 2023, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265396669
8. Bozkurt, A. GenAI et al. Cocreation, authorship, ownership, academic ethics and integrity in a time of generative AI. Open Praxis 2024, 16, Issue 1, pp. 1–10). International Council for Open and Distance Education Oslo, Norway.
9. Farrelly, T.; Baker, N.. Generative Artificial Intelligence: Implications and Considerations for Higher Education Practice. Education Sciences 2023, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265022573
10. Jiao, J.; Afroogh, S.; Chen, K.; Atkinson, D.; Dhurandhar, A. The global landscape of academic guidelines for generative AI and Large Language Models. ArXiv 2024, abs/2406.18842. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:270764854
11. Karpouzis, K. Artificial Intelligence in Education: Ethical Considerations and Insights from Ancient Greek Philosophy. ArXiv 2024, abs/2409.15296. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:272832652
12. Khatri, B. B.; Karki, P. D. Artificial Intelligence (AI) in Higher Education: Growing Academic Integrity and Ethical Concerns. Nepalese Journal of Development and Rural Studies 2023, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:269379458
13. Kholod, S. B.; Momot, V. Providing academic honesty and data reliability to WOS indexed sources. Academic Review 2024, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:271060091
14. Kurtz, G.; Amzalag, M.; Shaked, N. A.; Zaguri, Y.; Kohen-Vacs, D.; Gal, E.; Zailer, G.; Barak-Medina, E. Strategies for Integrating Generative AI into Higher Education: Navigating Challenges and Leveraging Opportunities. Education Sciences 2024, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:269640956
15. Maity, S.; Deroy, A. Human-Centric eXplainable AI in Education. ArXiv 2024, abs/2410.19822. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:273654160
16. Miao, J.; Thongprayoon, C.; Suppadungsuk, S.; Valencia, O. A. G.; Qureshi, F.; Cheungpasitporn, W. Ethical Dilemmas in Using AI for Academic Writing and an Example Framework for Peer Review in Nephrology Academia: A Narrative Review. Clinics and Practice 2023a, 14, 89–105. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266699098
17. Miao, J.; Thongprayoon, C.; Suppadungsuk, S.; Valencia, O. A. G.; Qureshi, F.; Cheungpasitporn, W. Ethical Dilemmas in Using AI for Academic Writing and an Example Framework for Peer Review in Nephrology Academia: A Narrative Review. Clinics and Practice 2023b, 14, 89–105. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266699098
18. Roe, J.; Perkins, M. Generative AI and Agency in Education: A Critical Scoping Review and Thematic Analysis. ArXiv 2024, abs/2411.00631. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:273798567
19. Sasikala, P.; Ravichandran, R. Study on the Impact of Artificial Intelligence on Student Learning Outcomes. Journal of Digital Learning and Education 2024, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:272054429

20. Tan, M. J. T.; Maravilla, N. M. A. Shaping integrity: why generative artificial intelligence does not have to undermine education. Frontiers in Artificial Intelligence 2024, 7. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:271533462
21. Vistorte, A. O. R.; Deroncele-Acosta, A.; Ayala, J. L. M.; Barrasa, A.; López-Granero, C.; Martí-González, M. Integrating artificial intelligence to assess emotions in learning environments: a systematic literature review. Frontiers in Psychology 2024, 15. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:270643235
22. Wirzal, M. D. H.; Nordin, N. A. H. M.; Halim, N. S. A.; Bustam, M. A. (2024). Generative AI in Science Education: A Learning Revolution or a Threat to Academic Integrity? A Bibliometric Analysis. Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Ilmu Pendidikan: E-Saintika 2023, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:273340734
23. Yan, L.; Martínez-Maldonado, R.; Gaević, D. (2023). Generative Artificial Intelligence in Learning Analytics: Contextualising Opportunities and Challenges through the Learning Analytics Cycle. Proceedings of the 14th Learning Analytics and Knowledge Conference 2023. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265551929

Recuperando la Historia Agrícola a Través del Arte: Un Proyecto de Innovación Docente

Marta Sánchez Piñero[1], Alfonso Moriana Elvira[1], Mireia Corell González[1]*

[1] Departamento de Agronomía, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad de Sevilla.

* Correspondence: mcorell@us.e

Abstract: La historia de la agricultura y las variedades tradicionales de los cultivos constituyen aspectos escasamente abordados en el Grado de Ingeniería Agrícola de la ETSIA de la Universidad de Sevilla. Con el objetivo de subsanar esta carencia, se ha desarrollado un proyecto de innovación docente que integra arte y agronomía a partir del análisis de cuatro bodegones de Francisco Barrera, expuestos en el Museo de Bellas Artes de Sevilla. Estas obras proporcionan información relevante sobre la diversidad de frutas y hortalizas del siglo XVII, permitiendo al alumnado reflexionar sobre la estacionalidad y la importancia de las variedades tradicionales como fuente de diversidad genética. En colaboración con la Red Andaluza de Semillas y en el marco de la campaña "Describe una variedad tradicional", se ha implantado un huerto de variedades locales en los campos de prácticas. Durante el curso 2024-2025, estudiantes de las asignaturas de Agricultura Ecológica y Horticultura y Cultivos Ornamentales cultivaron 55 variedades de lechugas, acelgas, guisantes, habas, rúculas y rábanos. Esta iniciativa ha fortalecido sus competencias en conservación de la biodiversidad agrícola y vinculado el trabajo práctico con el análisis estacional de los bodegones. Asimismo, el proyecto ha contribuido al banco comunitario de semillas de la Red de Resiembra e Intercambio.

Keywords: Agricultura ecológica, variedades locales, productos de temporada, Aprendizaje basado en proyectos

1. Introducción

La formación de los futuros profesionales de la agronomía debe ir más allá del aprendizaje técnico y abarcar la comprensión histórica, cultural y ecológica de la agricultura. Sin embargo, la historia agraria y el conocimiento sobre las variedades tradicionales de los cultivos suelen ocupar un espacio marginal en los planes de estudio de los grados en Ingeniería Agrícola, limitando la capacidad de los estudiantes para entender la evolución de la diversidad cultivada y su relevancia actual [1]. Esta carencia es especialmente preocupante en un contexto de cambio climático y erosión genética, donde la conservación de variedades locales y la gestión sostenible de la biodiversidad agrícola son fundamentales para la resiliencia de los agroecosistemas [2,3].

En este marco, diversos estudios han resaltado la importancia de incorporar enfoques interdisciplinarios y metodologías activas en la enseñanza de la agronomía, combinando ciencias agrarias con disciplinas como la historia, el arte o la antropología para reforzar la conexión entre los estudiantes y los territorios agrícolas [3]. La integración de estas disciplinas no solo enriquece el aprendizaje, sino que también fomenta una mayor conciencia sobre la importancia de la diversidad genética y la sostenibilidad. Además, la creación de huertos de variedades tradicionales en entornos universitarios ha sido identificada como una herramienta eficaz para fomentar la conservación in situ de recursos fitogenéticos y para promover la adquisición de competencias prácticas en la gestión de bancos de germoplasma y en la agroecología [4]

En este contexto, el proyecto que presentamos busca subsanar estas carencias mediante una experiencia innovadora que combina arte y agronomía. Partiendo del análisis de cuatro bodegones de Francisco Barrera, expuestos en el Museo de Bellas Artes de Sevilla y representativos de la agricultura española del siglo XVII, el proyecto propone a los estudiantes una reflexión crítica sobre la estacionalidad de los cultivos y la diversidad agrícola de la época. Esta aproximación histórica y artística se complementa con la creación de un huerto de variedades locales en colaboración con la Red Andaluza de Semillas, fomentando así la participación activa del alumnado en la conservación de la biodiversidad cultivada y en la recuperación de saberes tradicionales.

En resumen, este proyecto de innovación docente es pertinente y necesario, ya que aborda una carencia en la formación de los ingenieros agrícolas, fomenta la conservación de la biodiversidad y conecta a los estudiantes con la historia agrícola a través del arte. De esta manera, se promueve una educación más completa y contextualizada, preparando a los futuros profesionales para enfrentar los retos de la agricultura moderna.

2. Material and Métodos

La innovación docente se implementó en dos asignaturas del Grado en Ingeniería Agrícola de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agrícola (ETSIA) de la Universidad de Sevilla: Agricultura Ecológica (4º curso) y Horticultura y Cultivos Ornamentales (3er curso).

Agricultura Ecológica

En la asignatura de Agricultura Ecológica, se dedicó una primera práctica de dos horas a introducir a los estudiantes en la importancia de las variedades tradicionales, el funcionamiento de los bancos de germoplasma y el proyecto de la

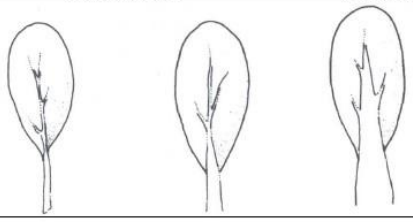
Red Andaluza de Semillas "Siembra una variedad". Durante esta sesión, se discutieron las mejores condiciones para propagar las variedades enviadas (acelga, lechugas, guisantes, habas, rúculas y rábanos). Posteriormente, los estudiantes prepararon semilleros de 50 variedades tradicionales y en las semanas posteriores estudiaron la germinación, registrando el porcentaje de germinación de cada variedad. En una segunda práctica, una vez obtenidas las plántulas, se estableció un huerto en los campos de prácticas de la ETSIA con las 46 variedades que germinaron.

Horticultura y Cultivos Ornamentales

En la asignatura de Horticultura y Cultivos Ornamentales, se realizó una práctica de dos horas en la que los estudiantes trabajaron con los bodegones de Francisco Barrera. Durante esta sesión, analizaron las especies hortícolas representadas en los cuatro bodegones y discutieron si estaban en las estaciones adecuadas según la climatología de la región de Sevilla. En una segunda parte de la práctica, los estudiantes diseñaron un ciclo de cultivo para garantizar el cultivo al aire libre y de temporada en las cuatro estaciones del año en la provincia de Sevilla.

Transcurridos un par de meses cada estudiante caracterizó morfológicamente 5 individuos de la variedad que se le fue asignada, aleatoriamente. La caracterización se realizó con los descriptores facilitados por la Red de semillas locales de Andalucía, en ellos se analizan las características morfológicas más importantes de las variedades, dependiendo de la especie. Se muestran en la Figura 1 un ejemplo de la nerviación de la hoja de acelga y sección de la penca. En la Figura 2 la ficha que se emplea en campo para la descripción y en la Figura 3 el resultado de la descripción. Cada alumno presenta en clase las características de su variedad, con todas las imágenes que realizo en campo.

D14. Extensión de las venas (Hace referencia a la anchura relativa de la porción de las venas presentes en el limbo foliar)

1. Estrecha	2. Intermedia	3. Ancha
		

D15. Sección de la penca (Hace referencia a la forma de la sección de la penca cuando se realiza un corte transversal de la misma)

1. Forma de U	2. Redonda	3. Semiredonda	3. Plana

Figura 1.- Ejemplo de la caracterización de las variedades, extracto del descriptor de la acelga (Red Andaluza de Semillas).

Descriptor Acelga (*Beta vulgaris L. var. Cicla*) – Ficha de campo

Datos medición	
Fecha toma de datos:	
Persona:	
Variedad:	

	SEMILLAS				PLANTA
	Color	Producción	Peso	Capacidad germinativa	Porte del follaje
1º					
2º					
3º					
4º					
5º					
Media					

N.R.A.: 10053-Sección 1ª
C.I.F.: G-91341156
Caracola del CIR. Parque de San Jerónimo s/n.
41015 Sevilla (España)
Tfno. / Fax 954-406-423
info@redandaluzadesemillas.org
www.redandaluzadesemillas.org

Figura 2.- Ejemplo de una ficha de caracterización de acelga (Red Andaluza de Semillas).

Rúcula de Les Refardes	
Ensayo	
Fecha de siembra	Desconocida
Porcentaje de germinación	98,06 %
Fecha de toma de datos	30/01 y 13/03/2023
Descriptores	**Datos**
Crecimiento de las yemas axilares y su ramificación	Tallos de las hojas alargadas, ramificadas
Tipo de ramificación del ápice floral	Racimos y flores simples
Contorno de la hoja	Dentada/serrada
Longitud de la hoja (cm)	40,03
Anchura de la hoja (cm)	16,8
Relación Longitud/Anchura	2,40
Forma de la hoja	Espatulada
Lóbulos de la hoja	Marcados
Espesor de la hoja (mm)	Intermedio-Estrecho
Color de la hoja	Verde oscuro
Desarrollo del tallo	Pequeño
Color de los pétalos	Cremoso amarillento
Posición de la silicua	Erecto
Frutos por silicua	Muchas (27)
Datos tomados por:	Lucía del Castillo Moscoso y Jesús Luque Muñoz

Figura 3.- Caracterización de la variedad Rúcula de Les Refardes (Red Andaluza de Semillas).

Posteriormente se recolectaron todas las semillas que fue posible y se entregaron a la Red Andaluza de Semillas para contribuir a refrescar su banco de germoplasma. La red posteriormente emplea esta caracterización para evaluar las semillas que sus socios intercambian.

Evaluación

Para evaluar el impacto de la innovación, se realizaron encuestas de los conceptos de producto de temporada antes y después de la sesión, así como sobre el ciclo de cultivo diseñado por cada estudiante. Estas respuestas, tanto de la encuesta como el trabajo realizado por los estudiantes fue corregido y calificado.

Los estudiantes presentaron las caracterizaciones de cada variedad, con una presentación en clase. Este trabajo se calificó y formó parte de la evaluación final de los estudiantes en las asignaturas.

3. Resultados

Las evaluaciones realizadas a los estudiantes permitieron medir tanto su grado de comprensión como su capacidad para aplicar los conocimientos adquiridos en un contexto práctico. Tras la experiencia, los resultados mejoraron en un 70 %, logrando que los estudiantes fueran capaces de diseñar un ciclo de cultivo de temporada, mientras que, al inicio, muchos presentaban dificultades para

identificar con claridad qué es un producto de temporada. Estos resultados son consistentes con estudios previos que demuestran que la adopción de métodos docentes innovadores tiene un efecto positivo sobre el rendimiento académico de los estudiantes [5].

La caracterización de variedades locales permitió a los estudiantes profundizar en el estudio de las características morfológicas de cada especie, su ciclo de cultivo y su fenología, consolidando así su conocimiento sobre los cultivos analizados. El 100 % de los estudiantes completó la tarea asignada, llevando a cabo la caracterización de la variedad correspondiente y exponiendo sus resultados en clase. Todas las actividades entregadas fueron evaluadas, y en el 90 % de los casos se observó una mejora en la calificación de los estudiantes, frente al resto de la nota de prácticas de la asignatura, lo que repercutió positivamente en el rendimiento general de las asignaturas.

Esta experiencia no solo ha reforzado la comprensión teórica y práctica de los estudiantes, sino que también ha potenciado su capacidad de análisis y aplicación en el ámbito agroalimentario, dotándolos de herramientas fundamentales para su desarrollo profesional. La relación entre la innovación educativa y el desarrollo de habilidades profesionales ha sido ampliamente documentada en estudios recientes [6].

5. Conclusiones

La participación del 100 % de los estudiantes en la innovación docente refleja el compromiso y la efectividad de las estrategias implementadas. Este enfoque ha tenido un impacto positivo en el rendimiento académico, con una mejora en el rendimiento de los estudiantes. Además de los avances académicos, la iniciativa ha contribuido a la valorización de las variedades locales y tradicionales, fomentando su estudio y preservación. Los estudiantes han participado activamente en la caracterización de los bodegones y las especies presentes en ellos, así como en la descripción de las variedades, lo que ha permitido generar conocimiento detallado sobre sus características. Asimismo, se ha logrado una contribución al banco de semillas de la Red Andaluza de Semillas, un esfuerzo clave para la conservación y el enriquecimiento del banco de semillas. Estos resultados evidencian cómo la integración de la innovación docente con el aprendizaje basado en la práctica no solo mejora el desempeño académico, sino que también promueve la sensibilización sobre la biodiversidad agrícola y la sostenibilidad.

Financiación: Este Proyecto fue posible gracias al proyecto de innovación docente financiado por el IV Plan Propio de la Universidad de Sevilla titulado Aprendiendo agronomía entre variedades tradicionales y cuadros de bodegones.

Agradecimientos: Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Red Andaluza de Semillas por su colaboración durante estos años, proporcionándonos las semillas y el material necesario para las descripciones. También queremos agradecer a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica por su valiosa contribución al mantenimiento del campo de prácticas de la escuela y su apoyo continuo a este tipo de proyectos.

Referencias

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction. FAO. ISBN: 978-92-5-131789-1.
2. Zimmerer, K. S., & De Haan, S. (Eds.). (2019). Agrobiodiversity: integrating knowledge for a sustainable future (Vol. 24). MIT press.
3. Moreno-Guerrero, A. J., Rodríguez-Jiménez, C., Gómez-García, G., & Ramos Navas-Parejo, M. (2020). Educational innovation in higher education: Use of role playing and educational video in future teachers' training. Sustainability, 12(6), 2558.
4. Fontalvo-Buelvas, J. C., Eugenio-Gozalbo, M., de la Cruz-Elizondo, Y., & Escalona-Aguilar, M. Á. (2023). Evaluating University Gardens as Innovative Practice in Education for Sustainability: A Latin-American Case Study. Sustainability, 15(5), 3975.
5. Gandía, J. L., & Montagud, M. D. (2011). Innovación docente y resultados del aprendizaje: un estudio empírico en la enseñanza de la contabilidad de costes. Spanish Journal of Finance and Accounting/Revista Española de Financiación y Contabilidad, 40(152), 677-698.
6. Macanchí Pico, M. L., Orozco Castillo, B. M., & Campoverde Encalada, M. A. (2020). Innovación educativa, pedagógica y didáctica. Concepciones para la práctica en la educación superior. Revista Universidad y Sociedad, 12(1), 396-403.

Proyecto de aprendizaje-servicio en Ingeniería Agraria

Rosario Castro, Mª Piedad Campelo, José B. Valenciano, Luis Herráez, Miguel Baeza, Lucía Fernández, Javier Rivera, Adrian Bécares, Luis Vidal, Esmeralda Alonso, Lucía del Pozo.[1]

Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal; Universidad de León, mrcasa@unileon.es, mpcamr@unileon.es, jbvalm@unileon.es, lhero@unileon.es, mbaezr00@estudiantes.unileon.es, lfernf12@estudiantes.unileon.es, jrivep01@estudiantes.unileon.es, abecar00@estudiantes.unileon.es, lvidag00@estudiantes.unileon.es, ealonc00@estudiantes.unileon.es, ldelps00@estudiantes.unileon.es.

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de los primeros dos años del proyecto de Aprendizaje-Servicio (ApS) que se está llevando a cabo en la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal (EIAF) de la Universidad de León (ULE). Los objetivos son trabajar en el "aprendizaje" de competencias genéricas de estudiantes de Grado en Ingeniería Agraria y de Máster en Ingeniería Agronómica y ofrecer un "servicio" a la sociedad mediante la realización de actividades formativas prácticas para niveles educativos preuniversitarios en temáticas relacionadas con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propias de la profesión de Ingeniero Agrario. Para validar la metodología empleada, se realizó la evaluación del aprendizaje mediante una rúbrica de evaluación de competencias genéricas dirigida a los estudiantes de la EIAF y la evaluación del servicio ofrecido mediante encuesta de satisfacción remitida a los centros receptores del mismo. Se obtuvieron resultados muy positivos lo que animó a seguir implementando estrategias de mejora continua, que posibilitaran el mantenimiento y formalización de las actividades. Para ello, en este curso 2024/2025 se realizó una convocatoria oficial abierta a todos los estudiantes de la EIAF, ofreciendo la participación en el proyecto, resultado de la cual se creó un grupo de trabajo de diez estudiantes, seleccionados según criterios académicos y entrevistas personales.

Palabras clave: Aprendizaje-Servicio, ApS, Competencias, Ingeniería-Agraria, Objetivos-Desarrollo-Sostenible, ODS

1. Introducción

Para favorecer la integración en el mercado laboral, las competencias específicas deben complementarse con las denominadas "soft skills" o competencias genéricas [1]. Estas competencias se corresponden con un conjunto de habilidades personales no tangibles, hábitos y actitudes que pueden resultar útiles en un amplio espectro de trabajos, tales como el liderazgo, empatía, sentido de la responsabilidad, integridad, autoestima, motivación, flexibilidad, toma de decisiones, capacidad de trabajar en equipo o gestión del tiempo. Estas habilidades complementan a las

"hard skills" o habilidades específicas, que son más técnicas, y están ligadas a un área de conocimiento concreta.

Por otra parte, las actividades propias de la metodológica "Aprendizaje - Servicio" (ApS o service-learning) favorecen la adquisición de competencias genéricas como las habilidades básicas de comunicación, la capacidad para trabajar en equipos multidisciplinares distribuyendo tareas y compartiendo responsabilidades, la empatía con los futuros oyentes, la gestión eficaz del tiempo [2].

El método docente ApS es una propuesta educativa que combina procesos de aprendizaje y de servicio a la comunidad en un proyecto único [3] y promueve que los estudiantes salgan del entorno académico para enfrentarse a la resolución de problemas reales requiriendo la aplicación de los conocimientos adquiridos para solucionarlos.

Además, la Universidad, como difusora y garante del conocimiento, e impulsora de la innovación y el progreso, cumple un papel fundamental para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Así, su labor en favor del Desarrollo Sostenible y la sensibilidad medioambiental debe ser potenciada.

La Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal (EIAF) de la Universidad de León (ULE) lleva trabajando en esta línea desde hace varios cursos, realizando talleres dirigidos a estudiantes de Centros de Educación Obligatoria (CEO) e Institutos de Enseñanza Secundaria (IES) de la ciudad y provincia de León, en los que participaron estudiantes de la EIAF como colaboradores, siempre tutorados por profesores. En las fases previas a la implantación de este proyecto se detectaron las siguientes necesidades:

- Mejorar la integración de las competencias específicas y de las competencias genéricas. Los alumnos de Grado y Máster de las titulaciones implicadas desconocen cómo orientar su propio aprendizaje de forma autónoma, así como enseñar en foros no especializados los conocimientos adquiridos dentro de la titulación;
- Incrementar la difusión de las enseñanzas de Ingeniería Agraria y de las competencias profesionales de nuestros titulados en la sociedad, especialmente a través de talleres prácticos que las acerquen a los estudiantes de Educación Infantil, Primaria, Secundaria y Bachillerato.

Se trata, por lo tanto, de resolver estos problemas, desarrollando de forma colaborativa, entre profesores y estudiantes universitarios, recursos, talleres, visitas y jornadas técnicas que acerquen la profesión del Ingeniero Agrario a los alumnos de otros niveles educativos integrando estas actividades dentro de su currículo y haciendo especial referencia a su vinculación con el cumplimiento de los ODS.

2. Materiales y Métodos

Tras la revisión y análisis de los materiales existentes para la evaluación de las competencias genéricas adquiridas mediante la metodología Aprendizaje – Servicio, se diseñaron de forma conjunta entre profesores y estudiantes de Grado y Máster talleres y actividades para estudiantes de Primaria, Secundaria y Bachillerato. Asimismo, se trabajó en el diseño de unidades didácticas y materiales que integrasen las competencias específicas con las competencias genéricas a evaluar. El cronograma desarrollado ha sido el siguiente:

- Octubre: jornada de presentación del proyecto de ApS a todos los estudiantes de la EIAF y envío de propuestas de actividades a los centros preuniversitarios;
- Noviembre a diciembre: selección de miembros del grupo según expediente académico y realización de entrevista personal y recepción de solicitudes de los centros receptores del servicio;
- Enero a marzo: realización de actividades de formación para los estudiantes de la EIAF participantes (seminarios) y de forma colaborativa, diseño de talleres y formaciones a realizar y cuantificación de los recursos necesarios;
- Marzo a mayo: los estudiantes de la EIAF, bajo la supervisión de los profesores involucrados en el proyecto, imparten los talleres y las formaciones a los estudiantes de los centros visitantes;
- Junio: evaluación formativa de los estudiantes de la EIAF y evaluación de la actividad.

Para esta última etapa del proyecto, los profesores de la EIAF implicados desarrollaron, por una parte, herramientas de evaluación para determinar si el uso de la metodología Aprendizaje-Servicio facilita el “aprendizaje” a los estudiantes de Grado/Máster de las competencias específicas y genéricas de forma integrada y, por otra parte, encuestas de satisfacción para evaluar si la experiencia de innovación docente es bien valorada por los centros receptores del “servicio”.

2.1. Rúbrica para la evaluación de la adquisición de las competencias genéricas de los estudiantes de la EIAF

Se elaboró, adaptando la metodología descrita por Villa Sánchez, A. *et al*. [4], una compleja rúbrica (20 ítems) para evaluar las siguientes seis competencias genéricas: trabajo en equipo, comunicación verbal, resolución de problemas, pensamiento creativo y creatividad, liderazgo, pensamiento práctico, algunas de ellas en diferentes niveles de dominio según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Competencia genérica evaluada, nivel de dominio, descripción y código de identificación.

Competencia genérica	Nivel de dominio	Descripción	Código
Trabajo en equipo	primero	Participar y colaborar activamente en las tareas del equipo y fomentar la confianza, cordialidad y la orientación a la tarea conjunta	TE1
Trabajo en equipo	segundo	Contribuir en la consolidación y desarrollo del equipo, favoreciendo la comunicación, el reparto equilibrado de tareas, el clima interno y la cohesión	TE2
Comunicación verbal	tercero	Conseguir con facilidad la persuasión y adhesión de sus audiencias, adaptando su mensaje y los medios empelados a las características de la situación y la audiencia	CV3
Resolución de problemas	segundo	Utilizar su experiencia y criterio para analizar las causas de un problema y construir una solución eficaz.	RP2
Resolución de problemas	tercero	Proponer y construir en equipo soluciones a problemas en diversos ámbitos, con una visión global	RP3
Pensamiento creativo	segundo	Formular variedad de preguntas y alternativas abiertas para comprender mejor la situación y generar acciones originales y razonadas.	PC2
Pensamiento creativo	tercero	Desarrollar de modo sistemático enfoques creativos y originales en la realización de las tareas y proyectos académicos o profesionales.	PC3
Creatividad	segundo	Generar ideas originales y de calidad, que se pueden plasmar de una manera formal y defenderlas en situaciones y/o problemas, tanto conocidos como desconocidos	C2
Liderazgo	segundo	Transmitir confianza y mover a otros a la acción	L2
Pensamiento práctico	segundo	Abordar situaciones nuevas o complejas con un enfoque propio que le conduce a diseñar y desarrollar un plan con acciones concretas para resolverlas	PP2

Para llevar a cabo esta evaluación se utilizó el complemento de hoja de cálculo de Google llamado CoRubrics, que permitió realizar de forma simultánea: evaluación (profesores a estudiantes), coevaluación (estudiantes entre sí) y autoevaluación (estudiante a sí mismo).

2.2 Encuesta de satisfacción para los centros receptores del servicio.

Empleando la herramienta para elaboración de formularios de Google, se generó un cuestionario para enviar por correo electrónico con una encuesta de satisfacción dirigida a todos los centros que recibieron el servicio, tanto aquellos que realizaron los talleres desarrollados en las instalaciones de la EIAF como los que acogieron las actividades formativas en los recintos del propio centro educativo receptor de la formación.

Los cuestionarios elaborados se estructuraron, entre otros, con los apartados: utilidad del servicio recibido, metodología, organización y recursos y capacidad docente de los estudiantes de la EIAF según se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Estructura de la encuesta de satisfacción dirigida a los centros que recibieron el servicio.

Aspecto evaluado	**Ítems (puntuados empleando escala Likert de 5 puntos)**
UTILIDAD DEL SERVICIO	- Se han cubierto las expectativas que tenía en relación con la actividad - Los contenidos desarrollados durante la acción formativa son útiles para completar la formación de sus estudiantes - Las actividades realizadas son útiles para conocer parte de las atribuciones profesionales del Ingeniero Agrario
METODOLOGÍA	- La tipología de los talleres ha sido adecuada - Los métodos didácticos empleados por los estudiantes formadores facilitan el aprendizaje - La distribución de grupos ha sido adecuada para el desarrollo óptimo de las actividades
ORGANIZACIÓN Y RECURSOS	- Los equipos, materiales y documentos empleados en las actividades son adecuados - Las instalaciones facilitan el desarrollo de las actividades - La duración de las actividades es adecuada - La organización y coordinación previa y durante el desarrollo de la actividad es adecuada
CAPACIDAD DOCENTE	- Los estudiantes formadores muestran tener dominio de los contenidos impartidos - Los estudiantes formadores adaptan las explicaciones técnicas al nivel formativo de los asistentes - Los estudiantes formadores consiguen mantener la el interés de los asistentes - Los estudiantes formadores resuelven dudas y facilitan la participación

Estas encuestas fueron cumplimentadas por los profesores que acompañaron a los estudiantes que recibieron los talleres.

3. Resultados

3.1. Resultados de la rúbrica para la evaluación de la adquisición de las competencias genéricas de los estudiantes de la EIAF.

Durante el curso 2022/2023 participaron en esta iniciativa cuatro estudiantes del Grado en Ingeniería Agraria, quienes, bajo la supervisión de sus profesores, diseñaron talleres de producción y sanidad vegetal, mecanización, construcciones y jardinería, vinculados con las ODS4, ODS11, ODS12, ODS13, ODS15 y ODS16. En el curso 2023/2024 el número de estudiantes que mostraron interés en participar en la experiencia se incrementó a siete.

Los resultados de la rúbrica de evaluación de las competencias genéricas se muestran en la Figura 1.

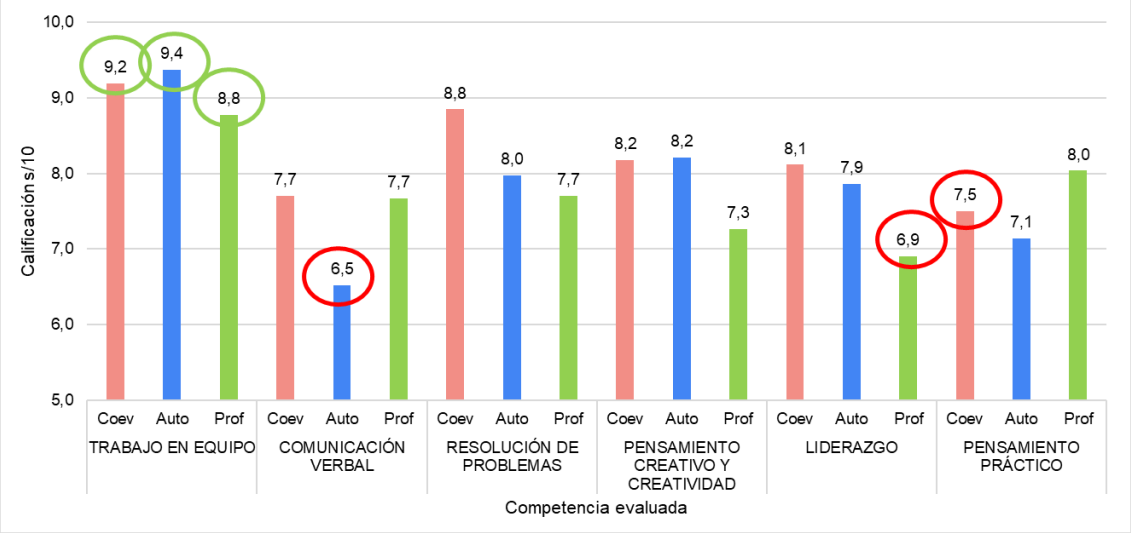


Figura 1. Calificación media de las competencias de los estudiantes participantes. Coev: evaluación de estudiantes entre sí; Auto: evaluación de estudiantes a sí mismos; Prof: evaluación de los profesores a los estudiantes.

3.2. Resultados de la encuesta de satisfacción dirigida a los centros receptores del servicio.

Durante el curso académico 2022/2023, se realizaron talleres para un total de 439 estudiantes procedentes de 20 centros de la provincia de León. En el curso 2023/2024 se realizaron talleres para un total de 608 estudiantes de más de 16 centros de la provincia de León y Valladolid.

En los dos cursos académicos evaluados el perfil de los centros solicitantes del servicio ha sido: 23% Educación Infantil, 33% Educación Primaria, 15% Educación Secundaria y 28% Bachillerato.

Los resultados de la encuesta han sido muy positivos, siendo la moda de todos los aspectos evaluados la máxima puntuación en la escala empleada y destacando especialmente los siguientes ítems:

- Se han cubierto las expectativas que tenía en relación con la actividad;
- Las actividades realizadas son útiles para conocer las atribuciones profesionales del Ingeniero Agrario;
- Recomendaría a otros profesores/centros realizar esta actividad formativa;
- Los estudiantes formadores muestran tener dominio de los contenidos impartidos;
- Lo estudiantes formadores resuelven dudas y facilitan la participación;
- Los contenidos desarrollados durante la acción formativa son útiles para completar la formación de los estudiantes;

- Los equipos, materiales y documentos empleados en las actividades son adecuados;
- Las instalaciones facilitan el desarrollo de las actividades.

Se registraron algunas observaciones adicionales que invitan a continuar mejorando en el desarrollo del proyecto, ya que proponen ajustar la duración de algunos talleres, que consideran demasiado breves para los contenidos tratados, o la organización previa para reducir y ajustar contenidos en función de sus preferencias. Algunos profesores, asimismo, demandaron incrementar el tiempo para las visitas a la finca de prácticas y las instalaciones de la EIAF

4. Discusión

La rúbrica realizada a nuestros estudiantes permitió detectar divergencias importantes entre su propia percepción y la de sus compañeros y profesores; así, como se puede observar en la Figura 1, en la autoevaluación (Auto.) los estudiantes consideran que su comunicación verbal es la competencia que menor nivel de adquisición registró (6,5/10), mientras que, según los profesores (Prof.) la competencia alcanzada en menor medida fue el liderazgo (6,9/10) y mediante la coevaluación (Coev.) se comprueba que los estudiantes perciben el pensamiento práctico como la competencia con un nivel de adquisición menor (7,5/10).

La competencia mejor valorada en cuanto a su nivel de adquisición fue, en todos los casos, el trabajo en equipo (Coev. 9,2/10, Auto. 9,4/10 y Prof. 8,8/10), observándose, en este caso, la concordancia en la valoración realizada por todos los agentes.

Además, esta rúbrica permitió conocer cuáles eran los puntos fuertes y débiles de los estudiantes, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Competencias genéricas mejor/peor valoradas. Puntos fuertes/débiles de los estudiantes evaluados.

Puntos fuertes: competencias con mayor nivel de adquisición	**Puntos débiles: competencias con menor nivel de adquisición**
TE2. Actúa constructivamente para afrontar los conflictos del equipo. TE1. Colabora en la definición, organización y distribución de las tareas del grupo. TE1. Se orienta a la consecución de acuerdos y objetivos comunes y se compromete con ellos. TE2. Se interesa por la importancia social de la actividad que se desarrolla en el grupo.	PP2. Elabora un plan coherente para resolver la situación. C2. Es capaz de plasmar de manera formal las ideas que genera (esquema, ecuación, etc). L2. Su reconocimiento de las actuaciones mueve a los otros a la acción. CV3. Fomenta la participación de sus audiencias y pregunta de forma constructiva para conseguir el diálogo.

5. Conclusiones

Con este trabajo se ha conseguido por un aparte, innovar en los métodos docentes fomentando el empleo de la metodología de Aprendizaje - Servicio en materias de la titulación de Ingeniería Agraria impartida en la EIAF, diseñar nuevos recursos docentes, al proporcionar materiales que serán de ayuda para aquellos profesores que quieran implantar este enfoque en sus asignaturas, asimismo se ha iniciado el trabajo en un grupo de mejora docente interdisciplinar entre áreas del departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Universidad de León, estudiantes universitarios, docentes y estudiantes de otros tramos educativos (Educación Primaria/Secundaria/Bachiller), consiguiendo la mejora en el aprendizaje de los estudiantes de la EIAF, especialmente en lo correspondiente con competencias genéricas en un entorno novedoso y estimulante por su aportación de servicio social (ApS).

Por otra parte los beneficios directos para los estudiantes de la EIAF participantes en la experiencia son, la mejora de sus conocimientos específicos, enseñando a otros, a través de la profundización requerida para la elaboración de actividades y de unidades didácticas relacionadas con sus competencias específicas, pudiendo conocer diferentes recursos de la educación ambiental: talleres, equipamientos ambientales, eco auditorías escolares, juegos y materiales didácticos, interrelacionando los conocimientos adquiridos en distintas disciplinas. Además, aprenden habilidades básicas de comunicación, organización del tiempo y empatía con los futuros oyentes, descubren la aplicación de los conocimientos teóricos, trabajando en equipos multidisciplinares distribuyendo tareas y compartiendo responsabilidades y todo ello realizando una labor social.

Por último, hay que destacar el servicio que recibe la sociedad en materia de conocimiento de las técnicas agrícolas, así como en materia de sensibilización medioambiental.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. UNESCO, 2018. Skills for a connected world. Concept note. Disponible en línea: https://ar.unesco.org/sites/default/files/unesco-mlw2018-concept-note-en.pdf Consulta: 13/02/2025]
2. Malinin, Laura Healey. 2017. Soft skill development in service-learning: towards creative resilience in design practice. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning. Volume 171, Issue 1
3. Arroyes, A., Batlle, C., Camps, A., Casas, T., Comes, P., Escardíbul, S., Graell, M., Martín, X., Muñoz, A., Puig, J.M., Rubio, L., Vila, A. 2010. Prácticas de ciudadanía: diez experiencias de Aprendizaje Servicio. Barcelona: Ediciones Octaedro, S.L. 199 p.

4. Villa Sánchez, A.; Poblete Ruiz, M.; Aprendizaje basado en competencias, una propuesta para la evaluación de competencias genéricas; Servicio de Publicaciones de la Universidad de Deusto: Deusto, España; 2007.

Estrategias de mejora en las enseñanzas de ingeniería mediante la aplicación de la metodología de Aproximación al Mundo Laboral (AML)

María Elena García [1]* y Manuel Moya [2]

[1] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia (Cáceres), España; egciadel@unex.es

[2] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia (Cáceres), España; manuelmi@unex.es

* Correspondence: egciadel@unex.es; Tel.: -34-927427000 Ext. 52170

Abstract: El Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la Universidad de Extremadura en Plasencia cuenta con un alumnado que proviene mayoritariamente de ciclos formativos de grado superior, lo que suele traducirse en una base limitada en materias técnicas y una baja autoestima en estas áreas. Esta situación genera desmotivación hacia algunas asignaturas relacionadas con matemáticas, física o química. Por esta razón, se ha implementado una metodología innovadora denominada Aproximación al Mundo Laboral (AML), que combina el aprendizaje basado en problemas con un enfoque práctico inspirado en el entorno profesional. Con la metodología AML se simula una empresa ficticia que sitúa al estudiante en un escenario similar al que puede encontrarse en el mundo profesional. Mediante escenas teatralizadas, los estudiantes deben enfrentarse a situaciones laborales reales en las que deben aplicar conocimientos específicos de asignaturas técnicas, como física, junto a competencias transversales como responsabilidad, capacidad de análisis, creatividad y ética profesional. La asistencia a clase se equipara al desempeño profesional, haciéndola obligatoria. Las encuestas realizadas a estudiantes del primer curso muestran una valoración positiva de esta metodología, pues incrementa la motivación del alumnado, hace las clases más dinámicas y refuerza su autoestima y madurez, además de contextualizar su estudio en un entorno profesional.

Keywords: Autoestima; física; química; matemáticas; mundo laboral; motivación; competencias transversales.

1. Introducción

Las tasas de abandono en estudiantes universitarios dependen de la temática estudiada, así como de la cualificación académica adquirida antes de llegar a la Universidad [1], [2]. Además, en muchos países y diferentes centros educativos se percibe una desmotivación general y falta de compromiso en los estudiantes [3], [4]. Por otro lado, según un estudio realizado hace unos años, la madurez de los adolescentes españoles llega, por término medio, a los 27 años [5]. Todos estos datos concuerdan bastante con la actitud general observada en el alumnado del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la Universidad de Extremadura (UEx). En dicho grado, es habitual la ausencia del alumnado a clase y la entrega de

trabajos de baja calidad, tanto técnica como lingüísticamente, independientemente de que se trate de las diferentes materias o del trabajo fin de grado que tienen que realizar para finalizar sus estudios universitarios. Se ha observado que esta desmotivación es mayor, si cabe, entre los alumnos que proceden de los Ciclos Formativos de Grado superior. La principal causante de esta situación podría ser, probablemente, la baja autoestima que tienen estos estudiantes debido a que poseen menor nivel de conocimientos en las materias técnicas de primer curso (matemáticas, física y química) en relación al alumnado procedente de Bachillerato. No obstante, a su vez, el alumnado de Bachillerato suele ser de menor edad, lo cual contribuye a tener cierta inmadurez (acorde con el estudio anteriormente mencionado).

Ante la situación descrita en el párrafo anterior, una gran parte del profesorado del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la UEx comparte la preocupación por elevar el nivel de madurez, compromiso y responsabilidad del alumnado de dicho Grado. Y en este contexto, desde las materias de Física y Técnicas de Laboratorio, asignaturas ambas del segundo semestre del plan de estudios, se ha realizado una experiencia docente innovadora, a la que se ha denominado Aproximación al Mundo Laboral (A.M.L.) que, a su vez, incluye otras metodologías como Aprendizaje por Servicio (ApS), Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), o el Aprendizaje colaborativo, entre otras, todas ellas suficientemente contrastadas en todo el mundo [6], [7], [8], [9], [10], [11].

El objetivo principal de la aplicación de dicha metodología es tratar de elevar la motivación del alumnado para el aprendizaje de los contenidos de tipo técnico, al tiempo que se desarrollan diversas competencias transversales y se fomenta la adquisición de un perfil ECI (alumnos Emocional y Competencialmente Inteligentes): responsabilidad y madurez, así como su nivel de compromiso, autoexigencia e implicación en su propio proceso de formación y en el de sus compañeros (aprendizaje comunitario y maduración grupal).

2. Materiales y Métodos

2.1. Metodología AML y la empresa ficticia GAIA

La metodología empleada en el presente estudio ha sido denominada “Aproximación al Mundo Laboral” (AML) y está basada en la simulación de un entorno empresarial ficticio, GAIA, diseñado para aproximar al alumnado a situaciones reales del mundo profesional. A través de esta dinámica, los estudiantes no sólo adquieren conocimientos técnicos, sino que también desarrollan competencias transversales esenciales para su futuro laboral, como la

responsabilidad, la comunicación efectiva, la capacidad de análisis y la toma de decisiones.

GAIA es una empresa simulada dedicada a los servicios ambientales, con una estructura organizativa definida. La profesora asume el rol de Belinda Linda, graduada en Turismo y emprendedora, fundadora de GAIA. Los estudiantes representan a Olmo Madera del Pino y Jara Pringosa Aromática, ingenieros forestales en prácticas. Dentro de este contexto, se plantean tareas y problemas reales que deben resolver aplicando los conocimientos adquiridos en asignaturas como Física y Técnicas de Laboratorio, ambas del primer curso del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la Universidad de Extremadura.

2.2. Funcionamiento en el aula

Cuando la profesora activa el escenario de GAIA en clase, adopta el personaje de Belinda, utilizando elementos de caracterización teatral (un sombrero rojo o simulación de embarazo con ropa amplia y cojín) y un discurso adaptado al rol, lo que contribuye a la inmersión del alumnado. Durante estas sesiones, que suelen ser breves, los estudiantes dejan de ser meros receptores de información y se convierten en "trabajadores en formación", enfrentándose a encargos y problemas reales del ámbito profesional.

Además, GAIA incorpora "normas de comportamiento" equiparables a las exigencias de una empresa real. Entre ellas se incluyen:

- Compromiso y responsabilidad, reflejados en la obligatoriedad de asistencia y la necesidad de justificar ausencias.
- Automotivación y actitud positiva, promoviendo el desarrollo personal y profesional.
- Conectividad y gestión de la información, destacando la importancia de la lectura de correos electrónicos y la actualización constante de conocimientos.

2.3. Ejemplos de actividades en GAIA

En el aula, en diferentes momentos, se entra en "modo GAIA" o "sesión GAIA". Cada sesión de GAIA se estructura en torno a un reto planteado por Belinda, que requiere aplicar conocimientos específicos. Algunos ejemplos incluyen:

- Efecto de las radiaciones en la salud: Belinda expresa su preocupación por la proximidad de una antena 5G y la Central Nuclear de Almaraz. Los estudiantes deben investigar los efectos de la radiación electromagnética, realizar prácticas en laboratorio y redactar una instancia formal solicitando información a la Consejería de Sanidad de la Junta de Extremadura.

- Equilibrio estático de un sólido rígido: Un error en la colocación de una maceta en un tablón con burrillas de la oficina conlleva que la maceta caiga y se rompa, produciendo, además, suciedad. Los estudiantes deben aplicar principios de física para corregirlo (momentos y equilibrio estático de un sólido rígido).
- Consumo energético en GAIA: Ante una factura elevada de electricidad, se les encarga a Olmo y Jara calcular el consumo energético de la oficina y proponer medidas de reducción de dicho consumo.
- Elección del emplazamiento para una vivienda: Belinda considera mudarse para evitar la radiación 5G y solicita asesoramiento sobre geopatías, líneas de Hartmann y eficiencia energética en la construcción de casas de paja.
- Realización de talleres didácticos de ciencia para niños (de la localidad donde se sitúa la empresa GAIA, encargados por el Ayuntamiento de dicha localidad). Belinda pide a Olmo y Jara diseñar y preparar talleres de ciencia que, en la realidad del aula, corresponden a la experiencia FOREXPO, actividad en la que los estudiantes del Grado explican una serie de talleres de física y medio ambiente a estudiantes de educación primaria que visitan el Centro Universitario de Plasencia. Se trata de una actividad de ApS que se viene realizando en la asignatura de Física desde hace doce años y que ahora es integrada en las tareas de GAIA [12].

Cada una de estas situaciones permite conectar la teoría con aplicaciones prácticas, fomentando el aprendizaje activo y significativo.

2.4. Evaluación de la metodología didáctica AML: encuestas de satisfacción del alumnado

Para evaluar la eficacia de la metodología AML, se diseñó una encuesta estructurada aplicada al alumnado participante. Se recogieron datos sobre la edad, el sexo y la procedencia académica, además de evaluar diferentes aspectos de la experiencia en GAIA. Dicha encuesta fue enviada al móvil de los alumnos a través de la red social WhatsApp. Las preguntas se formularon en diferentes formatos:

- Escala de Likert (1-4) para medir la motivación, el aprendizaje de competencias académicas y laborales, y la utilidad de la metodología.
- Selección múltiple para identificar las emociones generadas por GAIA y los aprendizajes adquiridos.
- Preguntas abiertas para conocer qué aspectos gustaron más y menos, así como sugerencias de mejora.

Las cuestiones que se plantearon en dicha encuesta se darán a conocer en el apartado de resultados, de modo que se puedan desglosar los resultados obtenidos

para cada una de ellas a partir de las opiniones proporcionadas por los estudiantes que participaron en esta experiencia.

3. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos en cada una de las cuestiones planteadas a los estudiantes de primer curso del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la Universidad de Extremadura han sido los siguientes:

Un total de treinta y cuatro estudiantes (34) respondieron al cuestionario elaborado para el fin propuesto en el presente trabajo. Como se puede observar en la figura 1, la mayoría de los estudiantes de primer curso (61,8% del total) tienen una edad comprendida entre los 21 y los 23 años, el 23,5% tienen entre 18 y 20 años y el 14,7% restante se sitúa entre los 24 y los 26 años, no habiendo nadie que comience la carrera con una edad superior a los 27 años.

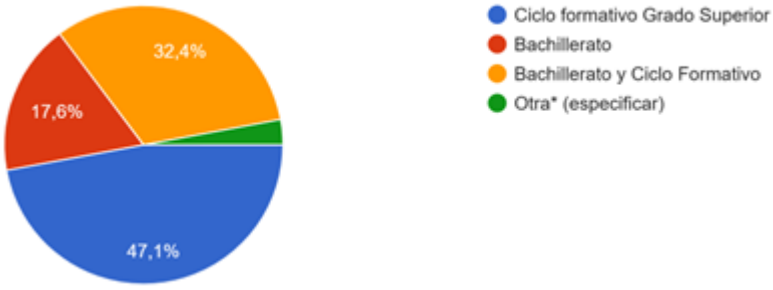


Figura 1. Edad de los estudiantes del primer curso de Ingeniería Forestal y del Medio Natural.

En cuanto al sexo, el 79,4% de los estudiantes son hombres, mientras que el 20,6% restante son mujeres. Por su parte, al ser cuestionados por la formación que les ha permitido acceder a los estudios de este Grado, se observa que mayoritariamente (47,1% de los encuestados) acceden desde ciclos formativos de Grado Superior, el 32,4% lo hace habiendo cursado bachillerato y un ciclo formativo, el 17,6% lo hace habiendo superado el bachillerato y el 2,9% restante (1 estudiante) respondió que procedía de bachillerato, ciclo formativo y un fracaso universitario previo. La figura 2 muestra gráficamente estos resultados:

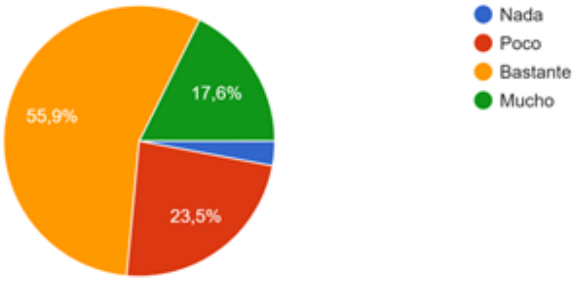


Figura 2. Nivel de formación previa de los estudiantes que han accedido al primer curso del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural.

Al analizar las cuestiones más directamente relacionadas con la implantación de la metodología de aproximación al mundo laboral, la figura 3 demuestra que se puede afirmar que ésta es considerada globalmente como muy o bastante motivadora con un 73,5% de las opiniones. Así, al 55,9% de los encuestados les resulta bastante motivador que se enfoquen desde la empresa GAIA las asignaturas de Física y Técnicas de Laboratorio, mientras que el 17,6% de ellos lo encuentra muy motivador. Por su parte, el 23,5% de los encuestados encontraron poco motivador este enfoque y el 3% lo consideró nada motivador.

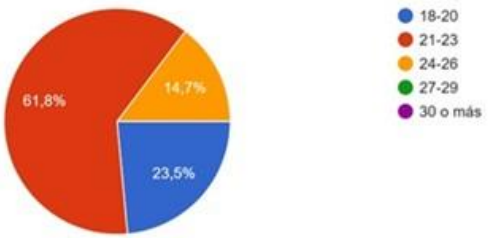


Figura 3. Nivel de motivación mostrado por los estudiantes al enfocar desde la empresa ficticia GAIA las asignaturas de Física y Técnicas de Laboratorio.

Cuando se cuestiona a los estudiantes por lo que les había aportado o generado la empresa GAIA, admitiendo en esta pregunta múltiples respuestas, éstos destacaron, por encima de todo, con el 64,7% de los votos, el compromiso, seguido, con igual porcentaje (44,1%), por la alegría y la motivación y apareciendo a continuación la madurez con un 23,5% de los votos. En el extremo opuesto, fueron tan sólo dos estudiantes (5,9% de los votos) los que respondieron que les generó desmotivación, mientras que tres de ellos (8,8% de los votos) lo vieron como una complicación o consideraron que les generó inmadurez, indiferencia y comprensión de para qué pueden servir las cosas. La figura 4 ilustra estos resultados:

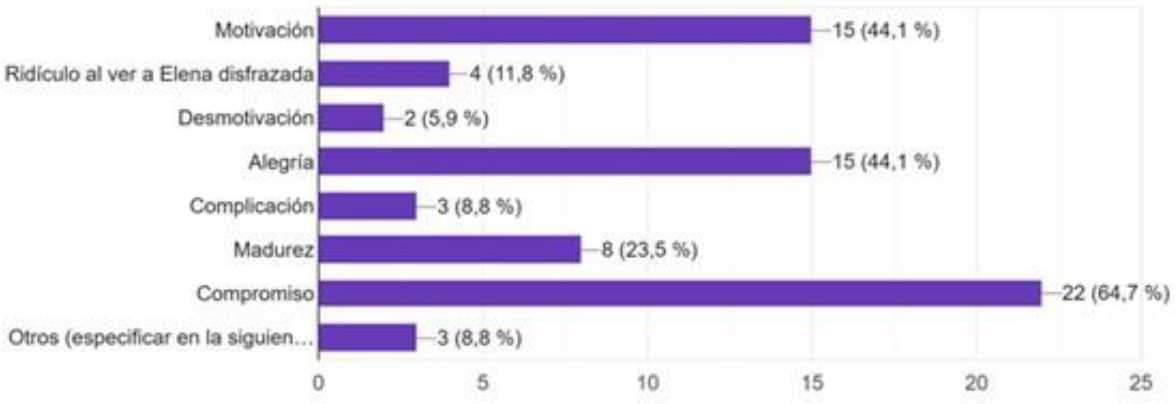


Figura 4. Sensaciones que les produce a los estudiantes la experiencia con la empresa ficticia GAIA.

Al preguntar a los estudiantes si conocían el significado del perfil E.C.I. de entre las cuatro opciones que se les planteaba, el 44,1% respondió correctamente, mientras que el 55,9% restante erró en la respuesta proporcionada, pues esos estudiantes eligieron cualquiera de las otras tres opciones que se les proporcionaba.

Por otro lado, al cuestionarles sobre si han aprendido competencias del mundo académico a través de GAIA, prácticamente tres de cada cuatro estudiantes han respondido afirmativamente (el 76,5%), de los cuales el 64,7% ha confesado que bastante y el 11,8% restante que mucho, mientras que el l7,6% ha dicho que poco y el 5,9% restante que nada. Estas respuestas se muestran gráficamente en la figura 5:

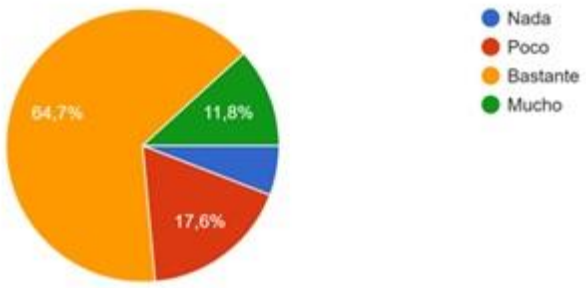


Figura 5. Respuestas de la percepción del aprendizaje de competencias del mundo académico a través de GAIA.

Del mismo modo, al ser cuestionados sobre si consideran que a través de GAIA han podido aprender valores o competencias propias del mundo laboral, 20 estudiantes (58,8% del total) consideran que sí han aprendido bastante de esos valores o competencias, otros dos (5,9%) que han aprendido mucho, mientras que diez

alumnos (el 29,4% del total) consideran que han aprendido poco y otros dos (5,9%) que nada. La figura 6 muestra dichos resultados:

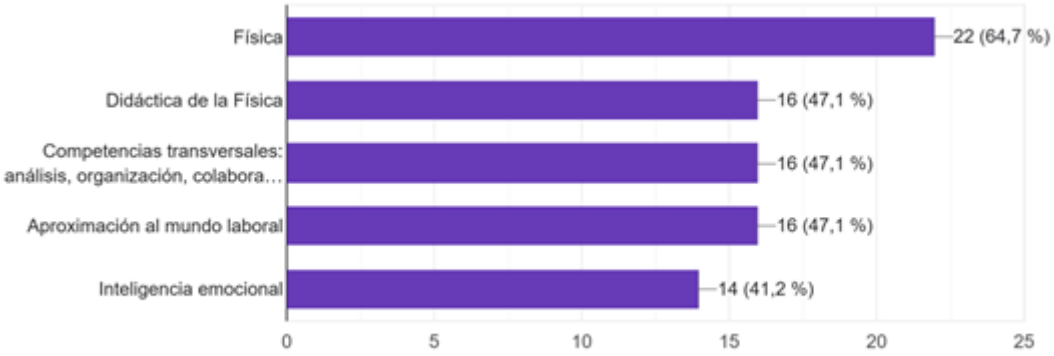


Figura 6. Respuestas de la percepción del aprendizaje de competencias del mundo laboral a través de GAIA.

Con el fin de conocer más de cerca lo que han podido aprender con GAIA, se les planteó diversas opciones con la posibilidad de responder a las que quisieran, no sólo a una de ellas, observándose que veintidós estudiantes (el 64,7% del total) reconocen aprender física, mientras que a partes iguales, con 16 votos cada una, equivalente al 47,1% del total, han afirmado aprender didáctica de la física, competencias transversales (tales como capacidad de análisis, organización, colaboración e investigación), así como aproximación al mundo laboral, en tanto que en ligera menor medida, pues fue apoyada por 14 estudiantes (41,2% del total), opinaron aprender inteligencia emocional. La figura 7 muestra gráficamente estas respuestas que han facilitado:

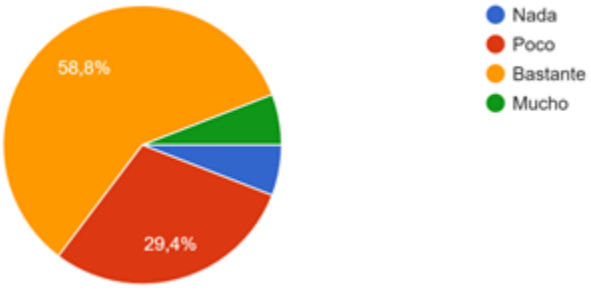


Figura 7. Respuestas de la percepción del aprendizaje a través de GAIA de diversas cuestiones que se les plantea.

Tras este bloque de preguntas más cerradas, se les ha realizado una serie de preguntas más abiertas en las cuales el estudiante podía manifestar libremente su percepción. Así, a la pregunta de qué es lo que más les ha gustado de GAIA, entre las respuestas recibidas destacan, entre otras, la motivación, la forma de explicar las cosas y de aprender el temario, viéndolo como más didáctico, el dinamismo de las clases, el compromiso que se adquiere, la cooperatividad que se requiere para

los casos que se les plantea, o la ventaja y liberación que para ellos supone que no haya necesidad de examinarse, pues les permite aprender sin esa presión añadida.

De manera similar, se les ha preguntado sobre los aspectos que menos les ha gustado de GAIA y entre las respuestas facilitadas cabe destacar la dificultad para adaptarse a un modelo de aprendizaje distinto al tradicional, algo a lo que no están acostumbrados, así como las autoevaluaciones que deben realizar, el excesivo trabajo que, en su opinión, les supone esta forma de aprendizaje, las tarjetas rojas con las que son sancionados cuando hacen algo de manera errónea, la poca participación que observan en algunos de sus compañeros o la actividad que se registra en el grupo de Whatsapp que han creado en horas o días que consideran inapropiados.

Al indagar sobre la forma en la que se podría mejorar la propuesta didáctica de la empresa ficticia GAIA de cara a próximos cursos, entre las sugerencias realizadas cabe destacar las que se refieren a la posibilidad de aplicar esta metodología en otras asignaturas de la titulación, la sustitución de algunas tareas por algún trabajo que les permita enfocar más a fondo el tema en cuestión, exigir más seriedad a los estudiantes para que se impliquen en mayor medida que lo que han observado en esta experiencia piloto, reducir el número de autoevaluaciones que deben realizar a lo largo del semestre o reducir el número de tarjetas que se les muestra cuando hacen algo indebido o que no esté a la altura de lo esperado.

Ante la cuestión que se les plantea de añadir alguna situación ficticia que les hubiera gustado vivir en la empresa GAIA, entre las respuestas recibidas se deben resaltar la petición de realizar más prácticas en aspectos relacionados con la asignatura de física, plantear un supuesto de quiebra de la empresa en la que los trabajadores sean quienes deban reflotar ésta, la realización de entrevistas de trabajo, la realización de visitas técnicas que les permita ver cómo se aplica en la realidad lo que están estudiando o la realización de alguna comida de empresa que les permita empatizar más con el resto de compañeros.

Finalmente, y como colofón a este estudio, se les ha preguntado a los estudiantes sobre la idoneidad de aplicar esta metodología de simulación de empresas en otras materias del Grado. La figura 8 muestra los resultados obtenidos:

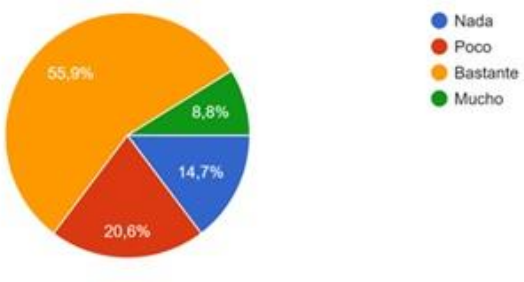


Figura 8. Respuestas proporcionadas sobre la idoneidad de aplicar la metodología a otras asignaturas del Grado.

Como se puede observar en la figura anterior, la mayoría de los estudiantes encuestados (64,7% del total) están bastante (55,9%) o muy de acuerdo (8,8%) con la posibilidad de que se aplicara esta metodología a otras asignaturas del Grado frente a un 35,3% que lo ven como poco (20,6% del total) o nada adecuado (14,7%). Quizás, al tratarse de una experiencia piloto, la retroalimentación recibida por parte de los estudiantes que han participado en esta encuesta y la observación directa realizada por la persona responsable de estas asignaturas pueden contribuir a perfeccionar ésta, mejorando y fortaleciendo los aspectos más débiles que se hayan podido detectar, e incluso añadiendo aspectos que quizás no se han tenido en cuenta en esta primera experiencia, de modo que pueda extrapolarse en el futuro a otras asignaturas en las que pueda encajar su aplicación.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones que se extraen del presente trabajo son las siguientes:

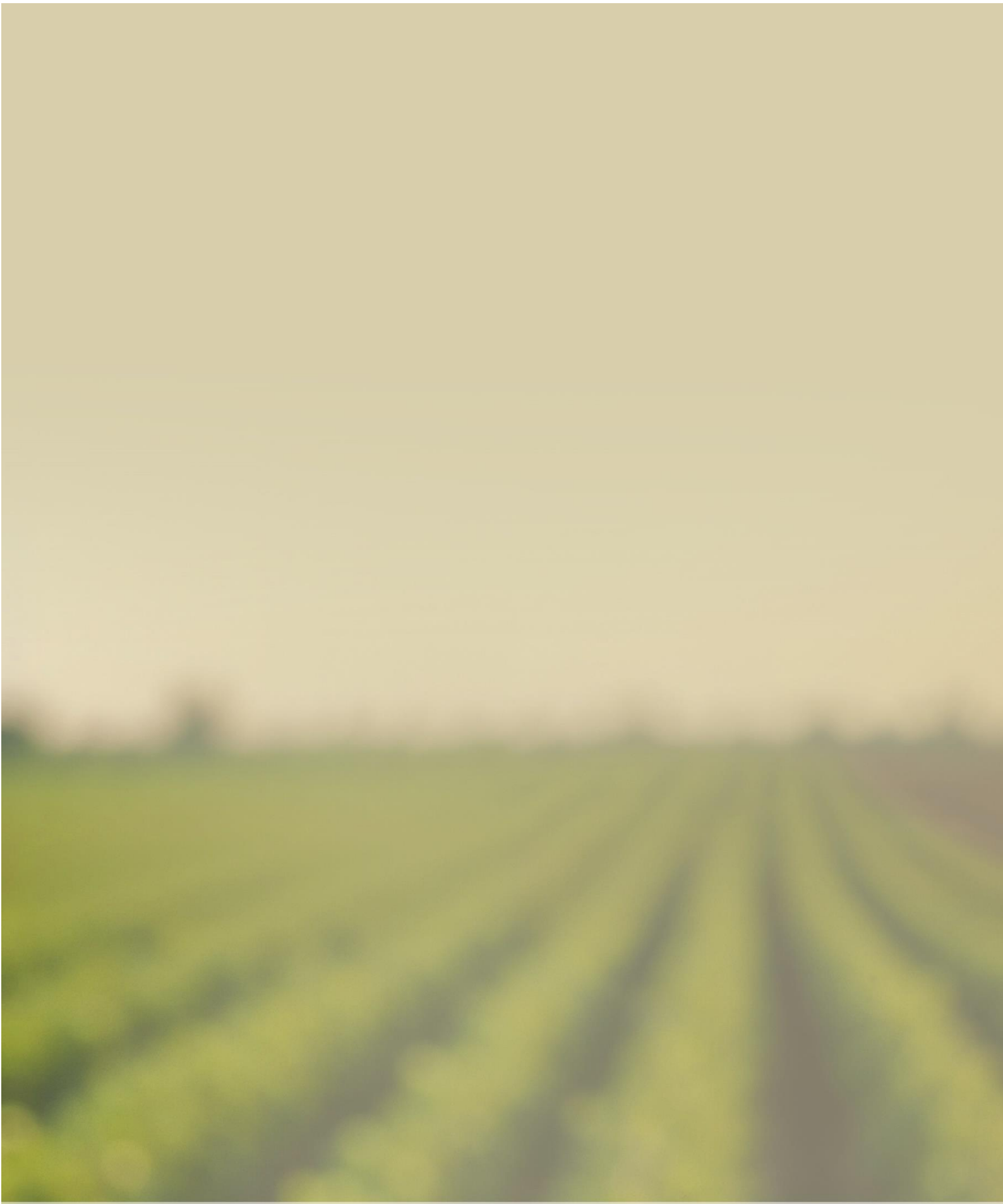
- Al igual que ocurre en otros centros educativos no sólo de España sino de otros países, existe un preocupante nivel de desmotivación en el alumnado universitario que no conviene minusvalorar. Por ello, se hace preciso intentar tomar medidas que incentiven la dedicación y nivel de aprovechamiento del alumnado durante su paso por la Universidad con el fin de formar profesionales emocional y competencialmente inteligentes.
- La mayoría de los estudiantes de primer curso encuestados han considerado que la metodología de aproximación al mundo laboral aplicada en las asignaturas de física y técnicas de laboratorio les ha aportado bastantes beneficios, adquiriendo un fuerte sentido del compromiso, incrementando su motivación por el aprendizaje y percibiendo un sentimiento de alegría al no sentir la misma presión que tenían con técnicas didácticas más tradicionales y permitir que las clases sean más dinámicas.
- La metodología de aproximación al mundo laboral permite potenciar en los estudiantes la adquisición y desarrollo de competencias transversales, tales

como la capacidad de análisis, organización, colaboración e investigación, así como la inteligencia emocional, reforzando su autoestima y madurez, cualidades cada vez más demandadas a nivel profesional.

- Entre los aspectos peor valorados por los estudiantes con la aplicación de esta metodología cabe resaltar el mayor volumen de trabajo que, en su opinión, tienen, la dificultad para adaptarse a una metodología que difiere sensiblemente de las técnicas didácticas más tradicionales o la falta de implicación de algunos de sus compañeros en las diversas actividades propuestas.
- Al tratarse de una experiencia piloto, es evidente que la metodología admite una serie de mejoras que permitan incrementar el nivel de implicación de los estudiantes, permitiéndoles adquirir conocimientos y competencias tanto académicos como profesionales. Por ello, la retroalimentación es esencial en ese proceso de perfeccionamiento, pues sólo con la ayuda de los estudiantes se pueden fortalecer los aspectos más débiles con el fin de incrementar su nivel de motivación, logrando así sacar lo mejor de ellos.
- Finalmente, son mayoría los estudiantes que consideran que esta metodología debería aplicarse en otras asignaturas del Grado, aunque introduciendo las mejoras oportunas para su adecuada implantación.

Referencias

1. W. Arulampalam, R. Naylor, and J. Smith, “Effects of in-class variation and student rank on the probability of withdrawal: Cross-section and time-series analysis for UK university students,” Econ Educ Rev, vol. 24, pp. 251–262, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.econedurev.2004.05.007.
2. J. Smith and R. Naylor, “Schooling effects on subsequent university performance: Evidence for the UK university population,” *Econ Educ Rev*, vol. 24, pp. 549–562, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.econedurev.2004.07.016.
3. G. DİŞLEN, “THE REASONS OF LACK OF MOTIVATION FROM THE STUDENTS’ AND TEACHERS’ VOICES,” *the Journal of Academic Social Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 35–35, Jan. 2013, doi: 10.16992/asos.13.
4. L. Legault, I. Green-Demers, and L. Pelletier, “Why do high school students lack motivation in the classroom? Toward an understanding of academic amotivation and the role of social support,” *J Educ Psychol*, vol. 98, no. 3, pp. 567–582, Aug. 2006, doi: 10.1037/0022-0663.98.3.567.
5. S. Sans, “Los expertos retrasan hasta los 27 años la edad en que los jóvenes maduran,” *La Vanguardia*, Jan. 24, 2013.
6. M. J. Newman, “Problem Based Learning: An introduction and overview of the key features of the approach,” 2005, *University of Toronto Press Inc.* doi: 10.3138/jvme.32.1.12.
7. D. Mayor Paredes, “Prácticas de aprendizaje-servicio como escenarios de confluencia entre la educación escolar y social,” *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 76, pp. 35–56, 2018, doi: 10.35362/rie7602847.
8. E. Montero, “Metodologías activas en la docencia universitaria: Competencias y Problem Based Learning Contenidos,” 2016.
9. E. Montero, “Metodologías activas en la docencia universitaria: aprendizaje basado en problemas Problem Based Learning , PBL Contenidos Aprendizaje y competencias ¿ Qué es Problem Based Learning ? Un caso de estudio Conclusiones,” 2016.
10. D. A. Kilroy, “Problem based learning,” *Emergency Medicine Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 411–413, 2004, doi: 10.1136/emj.2003.012435.
11. J. Bará, J. Domingo, and M. Valero, “Técnicas de Aprendizaje Cooperativo (AC) y Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP),” *Universidad Autónoma de Madrid*, pp. 1–140, 2011.
12. García, M.E.; Montero, M.J.; Benítez, R.; Moya, M. Hernández, J., “Enseñando se aprende más: estrategia metodológica de aprendizaje para alumnado universitario basada en exposición interactiva para colegios de educación primaria”, *Revista del Congreso Internacional de Docencia Universitaria e Innovación (CIDUI)*, pp. 1-9, 2014.



Entidades Colaboradoras e Patrocinadoras

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS

C I G R

INOVTECHAGRO

INIA URUGUAY

AJAVM ASSOCIAÇÃO DE JOVENS AGRICULTORES DO VALE DO MONDEGO

CCDR CENTRO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

BKT GROWING TOGETHER