

itea

información técnica económica agraria

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO

Volumen 121

Número 4

Diciembre 2025



aida-itea.org

2025- AÑO LVI
Vol. 121 N.º 4
<http://dx.doi.org/10.12706/itea>

DIRECCIÓN Y REDACCIÓN
Avda. Montañana, 930
50059 ZARAGOZA (ESPAÑA)
Tel.: 34-976 716305
Fax.: 34-976 716335
E-mail: direccion@aida-itea.org

Depósito legal: Z-577-82
ISSN: 2386-3765
Maquetación: Remedios Cordero

DIRECCIÓN:	Paula Gaspar, Universidad de Extremadura. España
EDICIÓN CIENTÍFICA:	José Manuel Alonso, CITA de Aragón. España Javier Álvarez, Universidad de Zaragoza (Campus de Huesca). España Miguel Escribano, Universidad de Extremadura. España Gabriel Pardo, CITA de Aragón. España Ana Pina Sobrino, CITA de Aragón. España Helena Resano, IA2-Universidad de Zaragoza. España Guillermo Ripoll, CITA de Aragón. España Ana Isabel Sanjuán, CITA de Aragón. España
EDICIÓN TÉCNICA:	María Salillas, Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario. España
COMITÉ DE REDACCIÓN:	Alfonso Abecia, Universidad de Zaragoza. España Alicia Cirujeda, CITA de Aragón. España Azucena Gracia, CITA de Aragón. España M ^ª Engracia Guerra Velo, CICYTEX, Extremadura. España Sandra Lobón, CITA de Aragón. España María Teresa Maza, Universidad de Zaragoza. España José Manuel Mirás Avalos, MBG-CSIC de Galicia. España Daniel Villalba, Universidad de Lleida. España
COMITÉ ASESOR:	Ricardo Aké, Universidad Autónoma de Yucatán, México; Joaquín Aibar, Universidad de Zaragoza, España; Francisco Alcón, Universidad Politécnica de Cartagena, España; Ángeles Calatayud, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España; Alba Cerisuelo, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España; Kizkitza Insausti, Universidad Pública de Navarra, España; Ramón Isla, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, España; Jorge Lora, Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea, España; Ana Meikle, Universidad de la República, Uruguay; Francisco Javier Mesías, Universidad de Extremadura, España; Ana Olaizola, Universidad de Zaragoza, España; Raquel Sánchez Pérez, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC), España; Manuel Serradilla, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura, España; Verónica Sierra, Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario, España; Alfredo Teixeira, Escola Superior Agrária de Bragança, Portugal; Luis Varona, Universidad de Zaragoza, España.

ITEA-Información Técnica Económica Agraria aparece indexada en SCI Expanded, Journal Citation Reports/Science Editions, ICYT, CABI, SCOPUS y EBSCO. Prohibida toda reproducción total o parcial sin autorización expresa de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario, Editor titular del copyright. ITEA no se responsabiliza necesariamente de las opiniones vertidas en los artículos firmados que publica, cuya responsabilidad corresponde a sus autores.

<https://www.aida-itea.org/index.php/revista-itea/presentacion-itea>



Texto y foto de portada: Javier Álvarez-Rodríguez

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, el censo de ganado ovino se ha reducido un 27 % entre 2010 y 2024, mientras otras especies se han mantenido prácticamente estables, como el caprino y el bovino, o han aumentado considerablemente, como el porcino y las aves. Aunque los datos del Panel de Consumo Alimentario en España reflejan que el consumo de carne de todas ellas se ha reducido en los últimos 15 años, en el caso de la carne de ovino/caprino el consumo ha pasado de 2,23 kg a 0,76 kg/cápita-año. Esta dinámica supone un reto para el mantenimiento de la diversidad genética del Catálogo Oficial de Razas de Ganado de España, donde existen 44 razas autóctonas ovinas, de las que 34 se encuentran en peligro de extinción, entre ellas, las dos razas de la fotografía, en primer plano, una oveja Ansotana con dos crías, y al fondo, una Churra Tensina, en una pradera permanente de montaña en primavera, la estación del año con mayor acumulación de partos y oferta de carne de cordero.

Agradecimiento

Desde el Comité Editorial de la Revista ITEA-Información Técnica Económica Agraria queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que han colaborado como evaluadoras de artículos durante este año.

La publicación en una revista indexada exige un proceso de evaluación *por pares* riguroso y transparente, que en ocasiones requiere la intervención de una tercera persona evaluadora para garantizar la máxima calidad y objetividad. En esta edición hemos contado con la participación de 38 revisores y revisoras, cuya labor ha sido clave tanto en los artículos finalmente publicados como en aquellos rechazados o aún en proceso de valoración.

Somos plenamente conscientes de que revisar un manuscrito supone dedicar un tiempo valioso que podría emplearse en proyectos propios de investigación. Además, sabemos que esta labor, esencial para mantener los estándares científicos y editoriales de la Revista ITEA, se realiza frecuentemente en momentos libres y con una gran dedicación. Por ello, queremos reconocer públicamente el compromiso y la generosidad de quienes han participado en este proceso.

Como muestra de agradecimiento, publicamos a continuación la relación de personas evaluadoras que han colaborado este año. No obstante, respetamos la decisión de quienes han preferido mantener su anonimato, por lo que la lista no es exhaustiva.

Francisco Alcón Provencio
Marta Elena Alonso de la Varga
Ramón Arias Sánchez
Juan Barriuso Vargas
Primitivo Caballero Murillo
Sara Cabezas-Díaz
Juan Castro Insua
Óscar Del Hierro
Angélica Espinoza Ortega
Sonia Galián Arnaldos
Pilar García Rebollar
Susana García Torres
Pedro González-Redondo
Etienne Groot
Juan Ignacio Gutiérrez Cabanillas
Teresa Juan Esteban
Carmen Julián Lagunas
Marco Andrés López Santiago

Montaña López Parra
David Martínez Granados
Felipe Martínez Pastor
Fernando Martínez Moreno
María José Milán Sendra
Nuria Nicodemus
Rafael Olmos Ruiz
Salvador Ordaz Silva
Ana Palacio Bielsa
Juan Carlos Pérez Mesa
David Polonio Baeyens
Francisco Requena
Pedro Luís Rodríguez Medina
Cornelio Rosales Jaramillo
Ana Isabel Sanjuán
Libia Iris Trejo
Ibán Vázquez González

Sumario

Producción Vegetal

Sistemas automáticos de monitoreo, nueva herramienta para la detección temprana de insectos plaga. Revisión bibliográfica.

Automated monitoring systems, a new tool for early pest detection. Review.

Edgar Rodríguez-Vázquez, Mónica Hernández-Rodríguez, Luis Alberto Aguirre-Urbe, Epifanio Castro-del Ángel, Francisco Marcelo Lara-Viveros y Agustín Hernández-Juárez 331

La fertilización foliar como potencial herramienta de manejo para el control de *Phytophthora citrophthora* en cítricos.

Foliar fertilization as a potential management tool for controlling Phytophthora citrophthora in citrus.

Aurora Moreno-Lora, Ana Aguado y Francisco J. Arenas-Arenas 354

Producción Animal

Segregación de la motilidad espermática en subpoblaciones como herramienta para mejorar el diagnóstico de la calidad seminal en verracos.

Segregation of sperm motility into subpopulations as a tool to improve the diagnosis of semen quality in boars.

Decio González-Villalobos y Armando Quintero-Moreno 368

Economía Agraria

Cultivo de plátano y aguacate en Canarias: una comparación de rentabilidades.

Banana and avocado crops in the Canary Islands: a profit comparison.

José Juan Cáceres-Hernández, Gloria Martín-Rodríguez, Dirk Godenau y José Ignacio González-Gómez 382

La dimensión económica de la sostenibilidad: Evaluación del impacto de los estándares de sostenibilidad en pequeños productores de banano en Colombia.

The economic dimension of sustainability: Evaluation of the impact of sustainability standards on small banana producers in Colombia.

Julieth Lizcano-Prada, Francisco J. Mesías y Marcela Maestre-Matos 402

Sistemas automáticos de monitoreo, nueva herramienta para la detección temprana de insectos plaga. Revisión bibliográfica

Edgar Rodríguez-Vázquez¹, Mónica Hernández-Rodríguez¹, Luis Alberto Aguirre-Uribe¹, Epifanio Castro-del Ángel¹, Francisco Marcelo Lara-Viveros² y Agustín Hernández-Juárez^{1,*}

¹ Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, México.

² Centro de Investigación en Química Aplicada, Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Resumen

La agricultura enfrenta desafíos significativos, como el uso excesivo de insecticidas que afecta la calidad de los productos y la optimización de la producción. La agricultura de precisión, impulsada por inteligencia artificial (IA), es una alternativa para mejorar la eficiencia, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la productividad. Esta tecnología permite la medición precisa de variables facilitando la toma de decisiones en tiempo real. El monitoreo de plagas es crucial, ya que su presencia puede reducir el rendimiento de los cultivos. La detección temprana mediante sistemas automatizados de monitoreo resulta una alternativa esencial para prevenir daños. La IA y el aprendizaje automático (ML) son fundamentales para el análisis de datos y la identificación de plagas de manera precisa y en tiempo real, lo que optimiza la toma de decisiones. Los sistemas automatizados de monitoreo, como los basados en imágenes, ofrecen ventajas en comparación con los métodos manuales tradicionales, permitiendo la detección de plagas con alta precisión. Estas tecnologías mejoran la eficiencia de la producción agrícola y promueven prácticas más sostenibles al reducir la intervención humana.

Palabras clave: Agricultura de precisión, automatización, monitoreo de insectos plaga, sensores.

Automated monitoring systems, a new tool for early pest detection. Review

Abstract

Agriculture faces significant challenges, such as the excessive use of insecticides that affects product quality and optimizes production. Precision agriculture, driven by artificial intelligence (AI), is an alternative to improve efficiency, reduce environmental impact, and increase productivity. This technology

* Autor para correspondencia: chinoahj14@hotmail.com

Cita del artículo: Rodríguez-Vázquez E., Hernández-Rodríguez M., Aguirre-Uribe L.A., Castro-del Ángel E., Lara-Viveros F.M., Hernández-Juárez A. (2025). Sistemas automáticos de monitoreo, nueva herramienta para la detección temprana de insectos plaga. Revisión bibliográfica. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 121(4): 331-353. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.011>



allows the precise measurement of variables, facilitating real-time decision-making. Pest monitoring is crucial, as their presence can reduce crop yield. Early detection through automated monitoring systems is an essential alternative to prevent damage. AI and machine learning (ML) are fundamental for data analysis and the precise identification of pests in real-time, optimizing decision-making. Automated monitoring systems, such as image-based ones, offer advantages over traditional manual methods, enabling pest detection with high precision. These technologies improve agricultural production efficiency and promote more sustainable practices by reducing human intervention.

Keywords: Automation, pest insect monitoring, precision agriculture, sensors.

Introducción

La agricultura actualmente desempeña un papel crucial en la supervivencia humana, en la producción de alimentos y está estrechamente relacionada con el sustento humano (Abioye *et al.*, 2020), pero enfrenta diversos retos que tienen que ver con el entorno en donde se realiza, tales como, la constante utilización de insecticidas, herbicidas y metales pesados en el suelo que merman la calidad comercial, nutricional e inocua de los productos agrícolas (Singh *et al.*, 2021). Además, el cambio climático, la urbanización, los problemas ambientales, aunado a la creciente demográfica prevista para el año 2050, compromete más la optimización de la producción agrícola actual (Chen y Yada, 2011; Singh *et al.*, 2021). Esta creciente demanda de alimentos derivado del aumento de la población, la cual requiere de innovaciones que permita alimentar a toda la humanidad y su adopción, forma parte de un proceso que inicia con el descubrimiento de nuevas aplicaciones de recursos para la producción (Chavas y Nauges, 2020).

Los sistemas de producción actuales se deben cambiar para poder satisfacer la demanda de alimentos a medida que el tiempo avanza y tomar en cuenta las consideraciones ambientales necesarias con el objetivo de evitar los impactos negativos que han generado los esquemas agrícolas vigentes (Singh *et al.*, 2021). En este sentido, la agricultura de precisión mediante la aplicación de inteligencia

artificial es una alternativa sostenible que mejora la producción al proporcionar una cantidad precisa de insumos a partir de sus aplicaciones prácticas (Subeesh y Mehta, 2021). Los métodos de producción tradicionales requieren la complementariedad de estas tecnologías innovadoras y mejoradas para acelerar el aumento de la productividad de una manera precisa, promoviendo así el desarrollo de una agricultura de alta calidad y alto rendimiento (Tian *et al.*, 2020). En los agroecosistemas, se implementan sistemas de control que permiten medir parámetros como la temperatura, fotoperiodo, humedad relativa, entre otros; estos sistemas proporcionan datos, los cuales son recopilados y se utilizan para la gestión de diversas actividades que buscan la optimización de la producción agrícola, al recibir información clave que orienta la toma de decisiones en el proceso productivo (Yi *et al.*, 2010; Farooq *et al.*, 2020).

El seguimiento oportuno de los cultivos juega un papel importante en la mejora del rendimiento y la calidad de los productos agrícolas, las medidas pertinentes incluyen la identificación y detección de plagas de las plantas (Li *et al.*, 2021). Las plagas afectan directamente el rendimiento de los cultivos e incluso causan su pérdida total, traducido en pérdidas económicas que afecta gravemente la subsistencia de la población, por lo cual, es importante detectar estas plagas a tiempo y establecer un método de control sobre su actividad (Zhang *et al.*, 2018). El monitoreo de insectos plaga es clave para los

agricultores, ya que al identificar con confianza una plaga es posible aplicar intervenciones correctas y oportunas (Leybourne et al., 2024). Esta técnica de muestreo implica la observación regular y la recopilación de datos sobre la presencia, abundancia y actividad de los organismos plaga (Das y Haloi, 2024). En esta actividad el personal capacitado inspecciona regularmente los cultivos en busca de actividad de insectos plaga utilizando métodos de exploración definidos y establecidos (Bashir et al., 2014; Arif et al., 2017). Dentro de las limitaciones principales de este método, es que pueden existir errores de percepción e interpretación por parte del personal encargado, que genera falsos positivos o estimaciones erróneas (Sütő, 2021).

A partir de esto, la detección de plagas asistido por computadoras ha sido utilizada durante los últimos años para el monitoreo de insectos plaga mediante la implementación de diferentes sensores (cámaras fotográficas, sensores de radiación, sensores de temperatura y humedad, entre otros) (Tian et al., 2020). Diversas investigaciones han mostrado el uso potencial de algoritmos de procesamiento para la identificación y conteo automático de insectos plaga (Qiao et al., 2008; Barbedo, 2020). Sin embargo, la mayoría de los sistemas han sido desarrollados para ambientes controlados (Espinoza et al., 2016; Liu et al., 2017; Moerkens et al., 2019). Una limitación de estas técnicas radica en la necesidad de equipos capaces de capturar datos ambientales en tiempo real, así como de registrar las capturas realizadas. Dado que no existen modelos de predicción establecidos, su análisis se completa con la colecta manual en las trampas. Diversas investigaciones, Solis-Sánchez et al. (2011), Liu et al. (2017), Zhong et al. (2018), Rustia et al. (2020), coinciden que realizar un monitoreo de las poblaciones de insectos plaga mediante sistemas automatizados constituye una herramienta eficaz para la detección temprana de brotes y la implementación oportuna de estrategias de control.

Recientemente el alcance de la tecnología en cuanto a la creación en miniatura de sensores, equipos y técnicas de procesamiento son más asequibles para realizar este tipo de prácticas, estos equipos permiten la vigilancia en tiempo real ya que pueden conectarse a internet fácilmente y proporcionar datos que facilitan la toma de decisiones (Lima et al., 2020). El presente escrito tiene como objetivo revisar investigaciones relacionadas con la detección y alerta temprana de insectos plaga en la agricultura. Su propósito es ofrecer a los investigadores una visión del estado actual de la aplicación de tecnologías en el área de la entomología, así como proporcionar una herramienta que facilite el desarrollo de nuevas investigaciones y aplicaciones. Para ello, se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas, seleccionando investigaciones publicadas en los últimos 15 años y relacionados al tema; periodo identificado como el de mayor implementación de investigaciones implicadas en el monitoreo de insectos plaga.

Sistemas de adquisición y procesamiento de datos

En la actualidad la agricultura utiliza herramientas y tecnologías para mejorar las prácticas agrícolas; su integración mejora la eficiencia, reduce impactos ambientales adversos en el espacio y tiempo correcto (Khanal et al., 2017). Con este enfoque, el diseño de sistemas de inspección en tiempo real, son utilizados a fin de facilitar el análisis y procesamiento de información que permite tomar decisiones oportunamente ante cualquier adversidad (Ojha et al., 2015). Dichos sistemas artificiales de inspección se han convertido en herramientas importantes en las actividades agrícolas y su implementación ha incrementado considerablemente, estos sistemas son basados en algoritmos de lenguaje

computacional, adaptados y adoptados como un componente de automatización utilizado para aumentar la productividad y la eficiencia de los agroecosistemas (Figura 1; Tian et al., 2020).

La implementación de sensores tiene diferentes usos de acuerdo con la problemática a atender, y su aplicación puede ser llevada a cabo en actividades tales como: la navegación terrestre, robótica, teledetección, automatización, obtención de imágenes, medición de variables ambientales entre otras, a fin de contribuir en la detección y visión de factores que tengan un impacto adverso en el crecimiento de los cultivos (Paul et al., 2022). En conjunto, las unidades de control o computadoras (Tabla 1) desempeñan un papel crucial en la conformación de estos sistemas, ya que se requiere capacidad de computación, almacenamiento y comunicación, tanto para el control como para la interacción con otros servidores (Zamora-Izquierdo et al., 2019).

Los sensores (Tabla 1) que componen este tipo de sistemas son de bajo costo de adquisición y, experimentalmente, tienen una buena precisión. Sin embargo, al mostrar deficiencias de diferentes índoles, pueden ser modificados y ajustados para tener valores más cercanos a la realidad de forma dinámica y continua (Tian et al., 2020). La implementación de objetos que conectados de forma constante a internet y a computadoras ha proporcionado, en los últimos años, una amplia variedad de tecnologías aplicables a diversas actividades agrícolas, con la capacidad de producir y consumir servicios en tiempo real (Farooq et al., 2020). La mayoría de estos sistemas se fundamenta, como primer paso, en la recopilación información mediante sensores, lo que permite obtener datos en tiempo real sobre el suelo, condiciones ambientales y la presencia de enfermedades o plagas, con el fin de predecir, mediante su análisis individual o combinado, la probabilidad de ocurrencia de ciertos escenarios en el campo (Cai et al., 2019).

La integración de dispositivos modernos de adquisición de datos es importante para la digitalización del sector agrícola, aunado a esto, la implementación de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) pueden facilitar su análisis, procesamiento e interpretación con la finalidad de tomar decisiones al momento de detectar cualquier anomalía que perjudique la producción (Laktionov et al., 2024).

Inteligencia artificial y aprendizaje automático

La agricultura 4.0 tiene como prioridad aumentar la productividad, distribuir adecuadamente los insumos, no generar un impacto negativo al ambiente y evitar el desperdicio de productos; adoptando tecnologías y sistemas de información avanzados que recopilan, analizan y procesan grandes cantidades de datos que permiten al agricultor tomar decisiones adecuadamente y en tiempo real (Zhai et al., 2020). Ante esto, el sector agrícola se ha convertido en demandante del desarrollo y aplicación de estas nuevas herramientas, que mejoran significativamente las actividades agrícolas debido a la constante necesidad de ser controladas y monitoreadas (Araújo et al., 2021).

Con el objetivo de replicar la inteligencia humana y con la finalidad de abordar problemas en la producción agrícola, la inteligencia artificial ha surgido como un área de investigación interdisciplinaria que busca brindar a computadoras la capacidad de aprender mediante el seguimiento de algoritmos que les permite identificar patrones a partir de datos, para poder dar solución a problemas específicos (Javaid et al., 2023). Mediante las aplicaciones de la IA se cubren diferentes actividades que engloban la producción agrícola como son: la gestión del suelo, nutrición de cultivos, control de malezas y la detección



Figura 1. Automatización de los sistemas de producción agrícola a partir de la implementación de nuevas tecnologías.

Fuente: Elaboración de los autores.

Figure 1. Automation of agricultural production systems through the implementation of new technologies.
Source: Authors' own elaboration.

Tabla 1. Sensores y controladores utilizados en la agricultura para adquisición y procesamiento de datos.
 Table 1. Sensors and controllers used in agriculture for data acquisition and processing.

Nombre del dispositivo	Datos que proporciona	Propiedad	Referencia
Sensor DHT11	Temperatura y humedad	Proporciona valores digitales a partir de la medición de los parámetros ambientales. Puede obtener datos nuevos cada dos segundos.	Gondchawar y Kawitkar (2016)
Sensor DHT22			
Sensor LM35	Temperatura	Tiene un rango de temperatura de funcionamiento de -55 C a 150 °C. Su voltaje de salida es directamente proporcional a la temperatura del ambiente monitoreado.	Alsayaydeh et al. (2024)
Sensor LM393	Humedad del suelo	El sensor de humedad del suelo tiene dos sondas que se insertan en el suelo. Las sondas se utilizan para pasar corriente a través del suelo. El suelo húmedo tiene menos resistencia y, por lo tanto, pasa más corriente a través del suelo, mientras que los suelos secos tienen una alta resistencia y pasan menos corriente a través del suelo.	Rajalakshmi y Devi (2016)
Sensor Ultra-Sonic	Detección de objetos y medición de distancias	Funciona bajo el principio de ondas sonoras y su reflexión. El transmisor transmite la onda sonora de 40 KHz y el receptor recibe la onda reflejada de 40 KHz. La velocidad del sonido en el aire ya se conoce. Por lo tanto, a partir del tiempo necesario para recibir de vuelta la onda sonora transmitida, se calcula la distancia del obstáculo. Aquí, se utiliza para la detección de obstáculos y también medir la distancia hasta el obstáculo. Su rango de funcionamiento es de 10 cm a 3 m.	De Simone et al. (2018); Donati et al. (2022)
Sensor electroquímico	pH y nutrientes del suelo	Los electrodos de los sensores funcionan detectando iones específicos en el suelo. Actualmente, los sensores montados en "trineos" especialmente diseñados ayudan a recopilar, procesar y mapear datos químicos del suelo.	Ali et al. (2020); Das et al. (2022)
Sensor Honeywell FSG15N1A	Compactación del suelo	Utiliza una sonda que penetra el suelo y registra las fuerzas resistivas mediante el uso de celdas de carga o medidores de tensión.	Rajak et al. (2023)
Estaciones meteorológicas agrícolas	Clima local	Unidades autónomas que se colocan en varios lugares de los campos de cultivo. Tienen una combinación de sensores que miden y registran datos como temperatura del aire, temperatura del suelo en distintas profundidades, precipitaciones, humedad relativa y absoluta, velocidad del viento, temperatura del punto de rocío, la dirección del viento, radiación solar y presión atmosférica.	Rivera et al. (2023); Morchid et al. (2024)

Tabla 1. Sensores y controladores utilizados en la agricultura para adquisición y procesamiento de datos (continuación).
 Table 1. *Sensors and controllers used in agriculture for data acquisition and processing (continuation).*

Nombre del dispositivo	Datos que proporciona	Propiedad	Referencia
Cámaras digitales	Imágenes en tiempo real	Proporcionan información de cultivos, brillo de la luz, medición fisiología vegetal y para medir el índice de área foliar (LAI), composición orgánica, análisis nutricional de cultivos y monitoreo de plagas y enfermedades.	Yang et al. (2014); Condotta et al. (2020)
Sensores GPS	Coordenadas espaciales	Se instalan en vehículos o dispositivos fijos utiliza datos espaciales para proporcionar información aplicable actividades como mapeo, representaciones topográficas, delimitación de límites, sistemas guía para equipos entre otros.	Garg et al. (2023); Upadhyay et al. (2024)
Microprocesador Raspberry Pi	Automatización y procesamiento de datos	Es una computadora pequeña utilizada para realizar operaciones informáticas y de red. Es posible la conexión del sistema de automatización con el dispositivo de control de ubicación remota. Tiene una CPU ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos de 900 MHz y RAM de 1 GB. También tiene: 40 pines GPIO, puerto HDMI completo, 4 puertos USB, puerto Ethernet, conector de audio de 3,5 mm, interfaz de cámara de video (CSI), interfaz de pantalla (DSI) y ranura para tarjeta Micro SD.	Billa et al. (2023); Mahore et al. (2024)
Microcontrolador Arduino	Automatización y procesamiento de datos pequeña escala	Controla dispositivos como sistemas de riego, estaciones meteorológicas y otros sistemas automatizados que monitorean las condiciones ambientales. Estos microcontroladores, combinados con sensores, permiten la automatización de diversas tareas en el campo.	Khan et al. (2024)
Microcontrolador ESP32	Automatización y procesamiento de datos pequeña escala	Posee conectividad Wi-Fi y Bluetooth, usados para enviar datos en tiempo real desde sensores a la nube o aplicaciones móviles. Dentro de sus aplicaciones dentro de la agricultura inteligente se encuentra, monitoreo remoto de invernaderos, sistemas de riego inteligente conectados a internet.	Pereira et al (2023)

de plagas y enfermedades; siendo una aplicación práctica la posibilidad de que agricultores puedan utilizar sus dispositivos móviles para la identificación de plagas o el manejo nutricional del cultivo en tiempo real (Figura 2) (Sharma y Shivandu, 2024).

Es importante señalar que la IA depende considerablemente de los algoritmos de ML para poder realizar el análisis de los datos y obtener una interpretación, con el fin de obtener soluciones para situaciones específicas (Javaid et al., 2022). La implementación de estos algoritmos dentro de las prácticas agrícolas reduce la demanda de expertos y automatiza las tareas de campo con mayor precisión (Meshram et al., 2021). El ML utiliza métodos y técnicas computacionales cuyo funcionamiento ha sido modificado y adaptado para volverlo más exacto (Patrício y Rieder, 2018).

Estos algoritmos son clasificados en cuatro grupos principales, Marsland (2011) lo establece de la siguiente manera: el primer grupo ubica a los “modelos de aprendizaje supervisado”, los cuales requieren de un conjunto de datos que sirven para entrenar al modelo dando únicamente información correcta como entrada para que el modelo sepa identificar el grupo de datos de interés. Por otro lado, los “algoritmos de aprendizaje no supervisado” comparan los datos de entrada entre sí para identificar y categorizar la información a partir de las similitudes identificadas. El tercer grupo incluye “Modelos de aprendizaje por refuerzo”, estos algoritmos son realizados a partir de toma de decisiones mediante ensayo y error. Estos algoritmos exploran diferentes opciones, evalúa y determina los resultados óptimos. Finalmente están los “modelos de aprendizaje evolutivo”, los cuales utilizan tres partes importantes en su funcionamiento: selección de características y remuestreo (procesamiento), aprendizaje y posprocesamiento (Telikani et al., 2021).

Teniendo en cuenta que los algoritmos de ML son capaces de otorgar recomendaciones o

predicciones enfocando su funcionamiento al sector agrícola, se pone de manifiesto la importancia que pueden llegar a tener estos algoritmos en cada fase de la producción de alimentos que va desde la siembra hasta la postcosecha (Meshram et al., 2021). Dentro de estas múltiples aplicaciones que pueden llegar a tener la IA y el ML destaca su implementación dentro de la detección de características de insectos plagas, para llevar a cabo su monitoreo de manera automática obteniendo información precisa y en tiempo real (Türkoğlu y Hanbay, 2019).

Sistemas automáticos de monitoreo de plagas

La obtención de información a gran escala, en tiempo real y de manera eficiente, es una parte imperativa de la producción y gestión agrícola moderna, ya que los métodos tradicionales de monitoreo de cultivos basados en visión manual no pueden cumplir con los requisitos de la agricultura de precisión (Cisternas et al., 2020). Clasificadas como semi o totalmente automatizadas, se pueden identificar estas aportaciones tecnológicas para el monitoreo de plagas. Un sistema completamente automático está compuesto con un software para la identificación y conteo de especies de insectos atrapados, mientras que un sistema semiautomático se basa en la identificación remota, y el conteo de insectos atrapados se realiza por un experto al observar las imágenes capturadas por la trampa equipada con una cámara (Čirjak et al., 2022).

Los sistemas basados en el monitoreo de plagas generalmente se encuentran habilitados con componentes de procesamiento que son adaptados a la necesidad que impera en el ambiente a controlar. El principio básico de este tipo de sistemas se basa en un modelo que identifica y separa objetos utilizando algoritmos de aprendizaje automático para dar

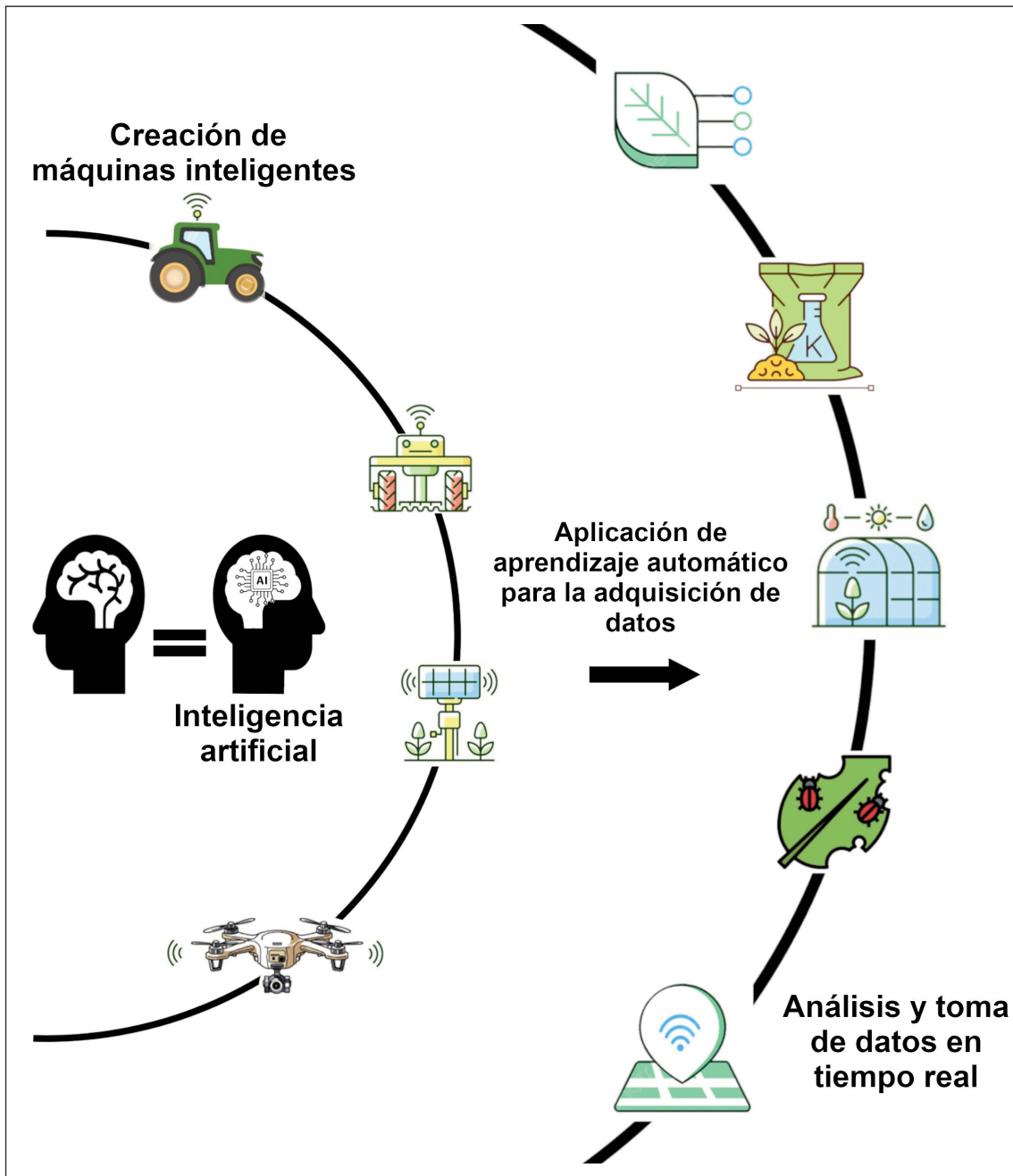


Figura 2. Aplicaciones de la IA y el ML en la gestión de las actividades agrícolas.
Fuente: Elaboración de los autores.
Figure 2. Applications of AI and ML in the management of agricultural activities.
Source: Authors' own elaboration.

forma a clasificadores que pueden brindar una alta precisión en la identificación (Dan-khara et al., 2019). Los importantes avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) e investigaciones cada vez más aplicadas bajo estos métodos han identificado a los sistemas automáticos de monitoreo como parte fundamental para la revolución de las prácticas agrícolas, ya que, al incorporar este tipo de herramientas, se puede mejorar con respecto a la toma de datos en campo, lo que permite que las prácticas agrícolas sean, cada vez más, planificadas con trabajos manuales mínimos (Subeesh y Mehta, 2021).

Durante los últimos años, las investigaciones orientadas hacia la aplicación de estos sistemas se han enfocado a la detección y conteo de insectos plaga en diferentes cultivos. Potamitis et al. (2009) establecen que mediante fotointerrupción, es posible realizar el monitoreo de insectos plaga utilizando trampas pitfall o funnel. Su funcionamiento se basa en que la entrada de la trampa está cubierta por un haz de luz, cuando el insecto ingresa, la luz se interrumpe y se registra el conteo de la plaga (Figura 3a). Posteriormente, las señales se amplifican, filtran, parametrizan y clasifican mediante métodos avanzados de aprendizaje automático en una computadora portátil. El enfoque propuesto condujo a resultados de detección en ensayos de campo reales, alcanzando una precisión del 99,1 % en registros de campo real de *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (plaga de las palmas) y el 100 % para *Sitophilus oryzae*, (plaga de arroz almacenado) ambos coleópteros de la familia Curculionidae.

En otro sistema, implementado por Guarnieri et al. (2011), utilizaron una trampa electrónica adaptada a partir de un modelo comercial para el monitoreo de *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae). Este sistema enviaba fotografías desde el huerto a un servidor remoto, capturadas por un teléfono móvil. La trampa enviaba una imagen diaria, lo

que, según los autores, facilitaba una elección más precisa para los métodos de control, mostrando una alta eficiencia en comparación con modelos convencionales (Figura 3b). Por su parte, Rustia y Lin (2017) determinaron el número de insectos plaga a partir de las capturas en trampas adhesivas de color amarillo, complementadas con datos ambientales obtenidos mediante sensores remotos. Cada estación de monitoreo estaba configurada para tomar imágenes procesadas cada 10 min y registrar las condiciones ambientales cada 5 min. Sus datos reportaron una precisión del 95 al 98 % en el conteo de plagas, lo que demuestra que su sistema permitió una cuantificación precisa de la incidencia de plagas, así como información sobre las condiciones favorecen su actividad (Figura 3c).

Liu y Chahl (2018) desarrollaron un sistema de visión multispectral para detectar plagas de invertebrados comunes en hojas verdes de cultivos en entornos agrícolas naturales. En sus experimentos, orientados a la detección de doce especies de plagas, se obtuvo un nivel aceptable de precisión. Además, el sistema tiene la capacidad de tomar decisiones de acción en tiempo real (Figura 3d).

Otras aplicaciones prácticas basadas en este principio fueron propuestas por Thangalakshmi y Ramanujan (2015), quienes desarrollaron una trampa electrónica con un sistema de seguimiento autónomo usando luces negras (ultravioleta) y luces LED. Utilizaron un sensor de imagen de bajo costo para capturar fotografías de las plagas atrapadas; las cuales se enviaban a una estación de control remoto. La información adquirida permitió mejorar la estimación de la densidad poblacional de plagas en los cultivos estudiados (Figura 4a). En su investigación, She et al. (2022) utilizaron un prototipo de trampa que incorporaba un atrayente sexual como método de atracción para *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae). Además, emplearon una cámara HD S-YUE para la gra-

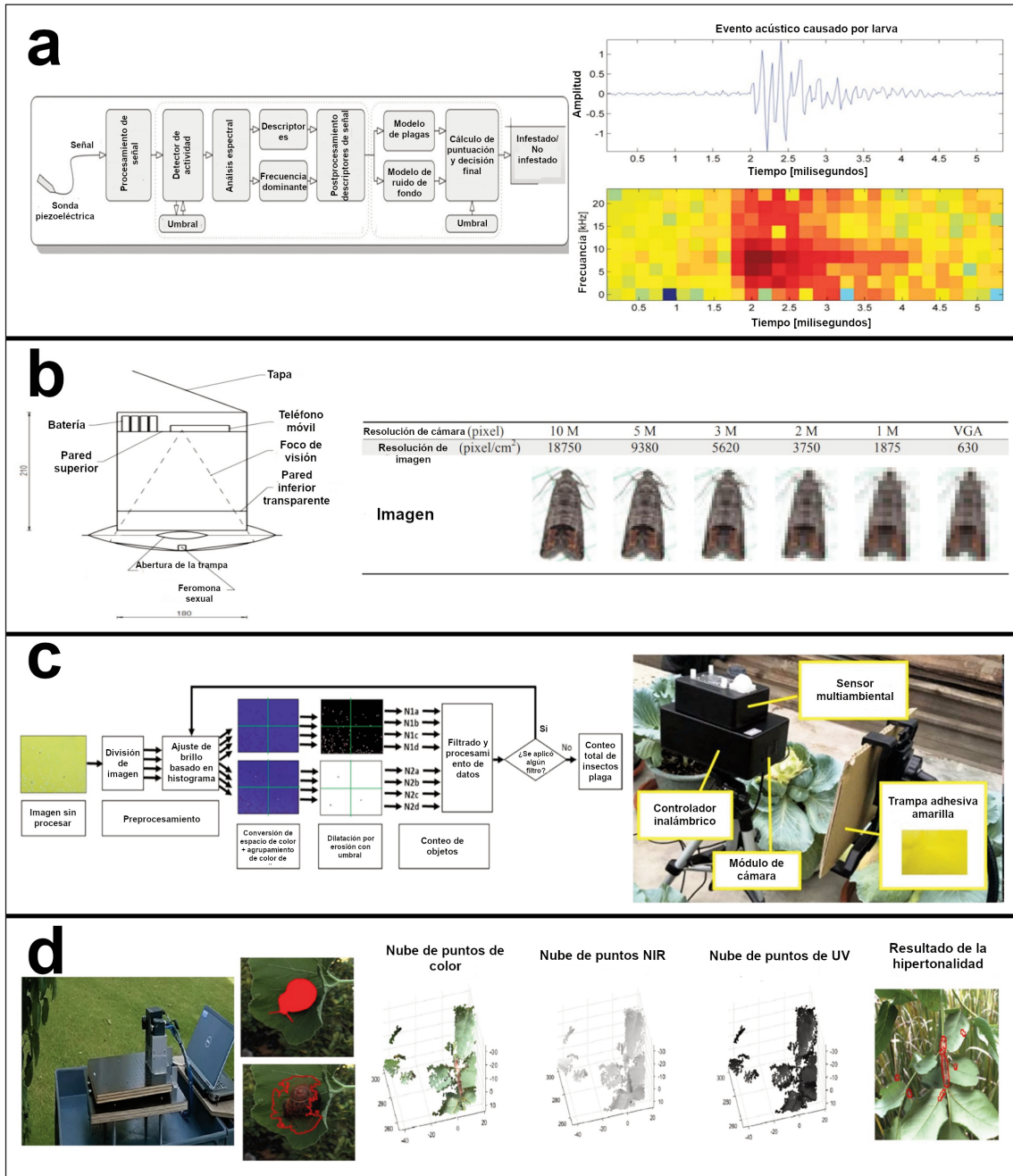


Figura 3. Resumen de los dispositivos de monitoreo de insectos plaga revisados anteriormente. a. Potamitis et al. (2009). b. Guarnieri et al. (2011). c. Rustia y Lin (2017). d. Liu y Chahl (2018).
 Figure 3. Summary of pest insect monitoring devices previously reviewed. a. Potamitis et al. (2009). b. Guarnieri et al. (2011). c. Rustia y Lin (2017). d. Liu y Chahl (2018).

bación de video y el método selectROI de OpenCV para capturar únicamente el área objetivo de la trampa. El algoritmo YOLOv5 fue utilizado para detectar y contabilizar la plaga objetivo. La precisión del recuento de individuos de *B. cucurbitae* que ingresan a la trampa alcanzó el 94,3 % (Figura 4b).

Por su parte, Flórián et al. (2023) propusieron un prototipo de trampa modificado para la captura y conteo automático de palomillas plaga (Lepidópteros), capaz de generar series temporales en tiempo real para cada especie monitoreada. A partir de capturas, el sistema permite seguir y describir los patrones de vuelo diario, facilitando pronósticos más precisos sobre brotes poblacionales (Figura 4c). Como se observa, estos sistemas no solo proporcionan datos de identificación, sino que también generan una base de información integral que permite predecir la tendencia de desarrollo de los insectos plaga y estimar su aparición, funcionando como herramientas complementarias a la actividad principal para la que fueron diseñados (Almryad y Kutucu, 2020). Esta capacidad predictiva depende de un monitoreo preciso y en tiempo real, apoyado en información ambiental complementaria del entorno donde se implementan los sistemas (Čirjak et al., 2022). Es importante considerar la precisión de estos métodos, ya que los falsos positivos pueden generar información poco eficiente para la toma de decisiones. Actualmente, el enfoque más eficaz para la detección de insectos plaga se basa en sistemas de análisis de imágenes integrados con algoritmos de aprendizaje automático (Almryad y Kutucu, 2020).

Detección de plagas por medio de imágenes

Con la intención de monitorear y prevenir eficazmente infestaciones de poblaciones de insectos plaga en un cultivo, han sido desa-

rolladas diversas soluciones tecnológicas dentro de la producción agrícola, como lo son los enfoques de monitoreo basados en el análisis de imágenes (Wang et al., 2021). Generalmente, estos dispositivos utilizados en el monitoreo de insectos presentan dos formas de aplicación: la primera mediante dispositivos portátiles, y la segunda a partir de dispositivos estacionarios, que aplican la obtención de datos y su interpretación para detectar y reconocer el insecto plaga en cuestión (Ayan et al., 2020). En ambos casos, su funcionamiento se basa en sistemas que obtienen imágenes digitales, y su procesamiento se encarga de la obtención de información (Wang et al., 2021). En el caso de los métodos portátiles, generalmente la calidad de las imágenes suele ser baja, ya que utilizan imágenes satelitales o imágenes obtenidas a partir de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) y al tratar de identificar plagas de tamaño pequeño en entornos de grandes áreas de análisis, las características suelen ser poco definidas (Reynolds y Riley, 2002). En el caso de métodos estacionarios, la detección de plagas se lleva a cabo en entornos específicos del área de cultivo y su calidad en cuanto a la obtención de imágenes depende en gran medida de factores como la iluminación, el movimiento de la trampa y el tamaño del insecto (Wang et al., 2021). Generalmente, estos módulos de monitoreo están compuestos por hardware y software: el primero contiene el sistema trampa (cuerpo, sistema de retención y atrayente), así como los componentes electrónicos que adquieren las imágenes. El software se encarga del análisis de la información recabada para identificar y contar automáticamente los insectos capturados (Prete et al., 2021).

En el análisis de imágenes, una fotografía se puede representar como una cuadrícula rectangular bidimensional de píxeles, en donde, cada píxel representa un dato en un punto de la imagen y se ubica utilizando valores enteros positivos en un sistema de coordenadas

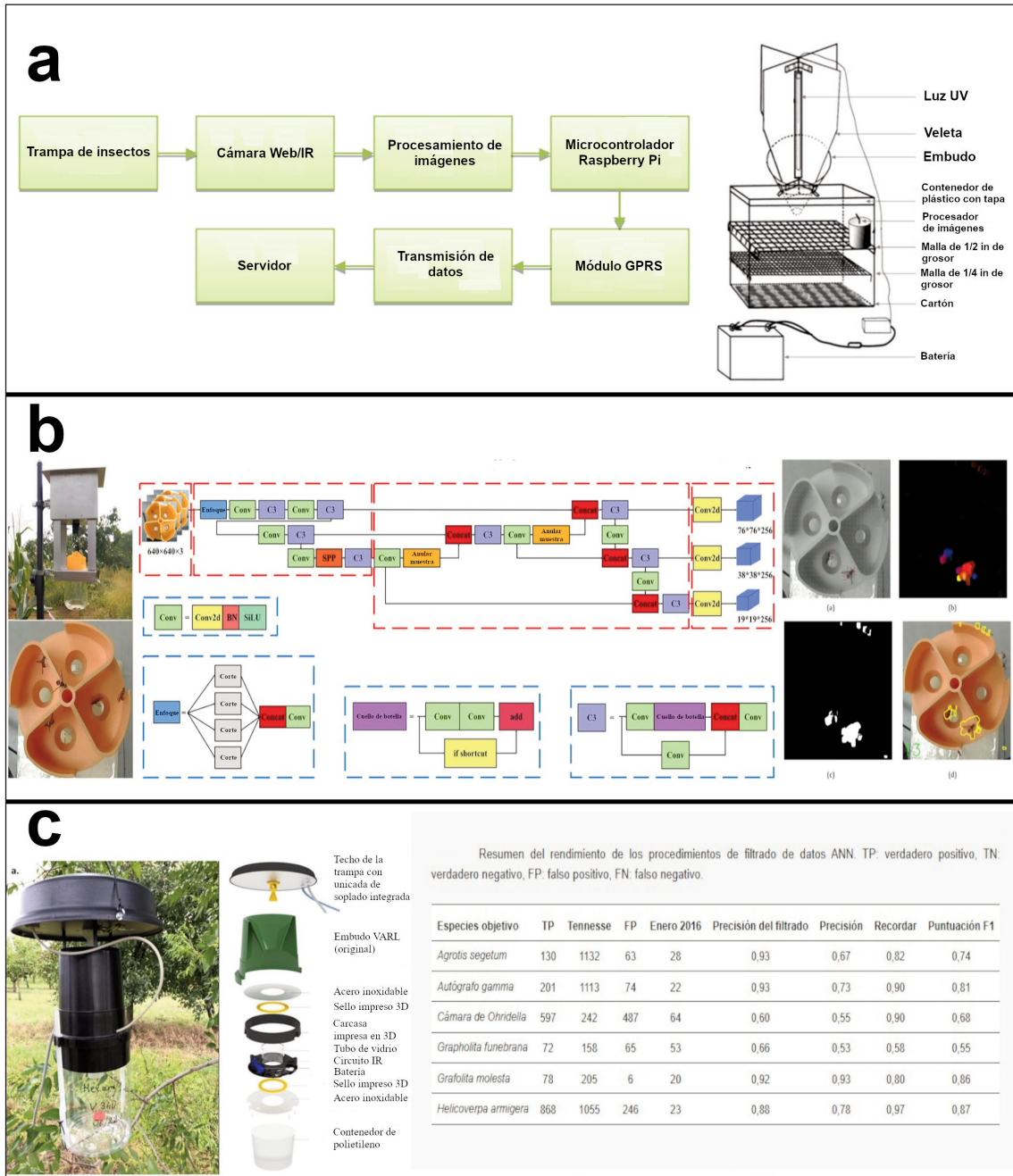


Figura 4. Resumen de los dispositivos de monitoreo de insectos plaga revisados anteriormente.

a. Thangalakshmi y Ramanujan (2015). b. She et al. (2022). c. Flórián et al. (2023).

Figure 4. Summary of pest insect monitoring devices previously reviewed. a. Thangalakshmi y Ramanujan (2015). b. She et al. (2022). c. Flórián et al. (2023).

cartesianas (Gupta e Ibaraki, 2014). Las cámaras digitales juegan un papel importante dentro de este tipo de actividades; recientemente han surgido como una herramienta que proporciona información de brillo y contraste, resolución, profundidad de color, entre otros (Yu et al., 2024). A pesar de esto, cuando las imágenes se capturan en campo, existen deficiencias considerables que tienen que ver con la óptica resultante, lo que presenta un desafío importante al momento de su procesamiento, estas deficiencias se ven influenciadas principalmente por diversos factores que impide al usuario implementar los mismos criterios, ya que el entorno agrícola manifiesta diversas variaciones que distan mucho de las condiciones ideales para la captura de la imagen (Liu et al., 2016).

Los métodos de detección a partir de imágenes se dirigen a identificar, mediante clases, a una determinada plaga objetivo (objetivo presente) mediante una clasificación, donde se discriminan aquellos objetivos que no son de interés (objetivo ausente) (Barbedo, 2020; Rodríguez-Vázquez et al., 2024). La discriminación entre estas clases requiere experiencia y tiempo para el desarrollo de los programas encargados del procesamiento de las imágenes, donde las principales problemáticas se inclinan a la recopilación de información, que sirve como base de datos de referencia, y la posterior obtención de imágenes para entrenamiento en condiciones de campo reales (Figura 5; Almryad y Kutucu, 2020).

El análisis de imágenes mediante software, acompañado de una evaluación previa de las características del sitio de monitoreo y de la actividad del insecto plaga de interés, resulta adecuado para la obtención de resultados rápidos y de mayor precisión. Estos sistemas integran múltiples herramientas capaces de capturar aspectos que tienen que ver con la geometría, morfología y textura de las fotografías. Además, permiten generar datos en tiempo real sobre la dinámica poblacional de

los insectos, lo que los convierte en un recurso clave para emitir alertas tempranas y establecer acciones oportunas de manejo y control (Barbedo, 2020; Čirjak et al., 2022; Rodríguez-Vázquez et al., 2024).

Necesidad de los sistemas automáticos en la alerta temprana de insectos plaga

Los modelos de alerta temprana y pronóstico de presencia de insectos plaga han sido utilizados como parte de las estrategias de control dentro del enfoque de Manejo Integrado de Plagas (MIP). Su objetivo principal es anticipar una infestación que puedan afectar negativamente la producción (Mora-Aguilera et al., 2021). En la mayoría de los casos, esta labor se realiza mediante tratamientos localizados que limitan el crecimiento poblacional de las plagas, evitando así las aplicaciones de pesticidas cuando su presencia no justifica el uso de dichos productos (Figura 6; Dara, 2019). Estas labores comprenden actividades como: redes de barrido, golpeo de vegetación –conocidos como métodos activos– y métodos estáticos, en los cuales se ubican trampas de agua, trampas pegajosas, trampas Malaise y trampas de succión, por mencionar algunas (Yen et al., 2013). Este tipo de labores pone de manifiesto que el monitoreo manual produce precisión en cuanto a la detección, pero también requiere mucho tiempo y es laborioso. Enfáticamente, la demora en adquirir información con respecto al estado de la plaga que puede afectar significativamente el rendimiento y la calidad de los productos (Li et al., 2021).

El monitoreo de plagas tradicional depende en gran medida de la mano de obra para recopilar la información de un punto a otro, lo que lo convierte en una actividad deficiente y poco precisa (Jiang et al., 2008). Un factor importante a considerar en los métodos tradicionales de monitoreo es el tiempo en el que se realiza el trabajo. Por ejemplo, Yen et al.

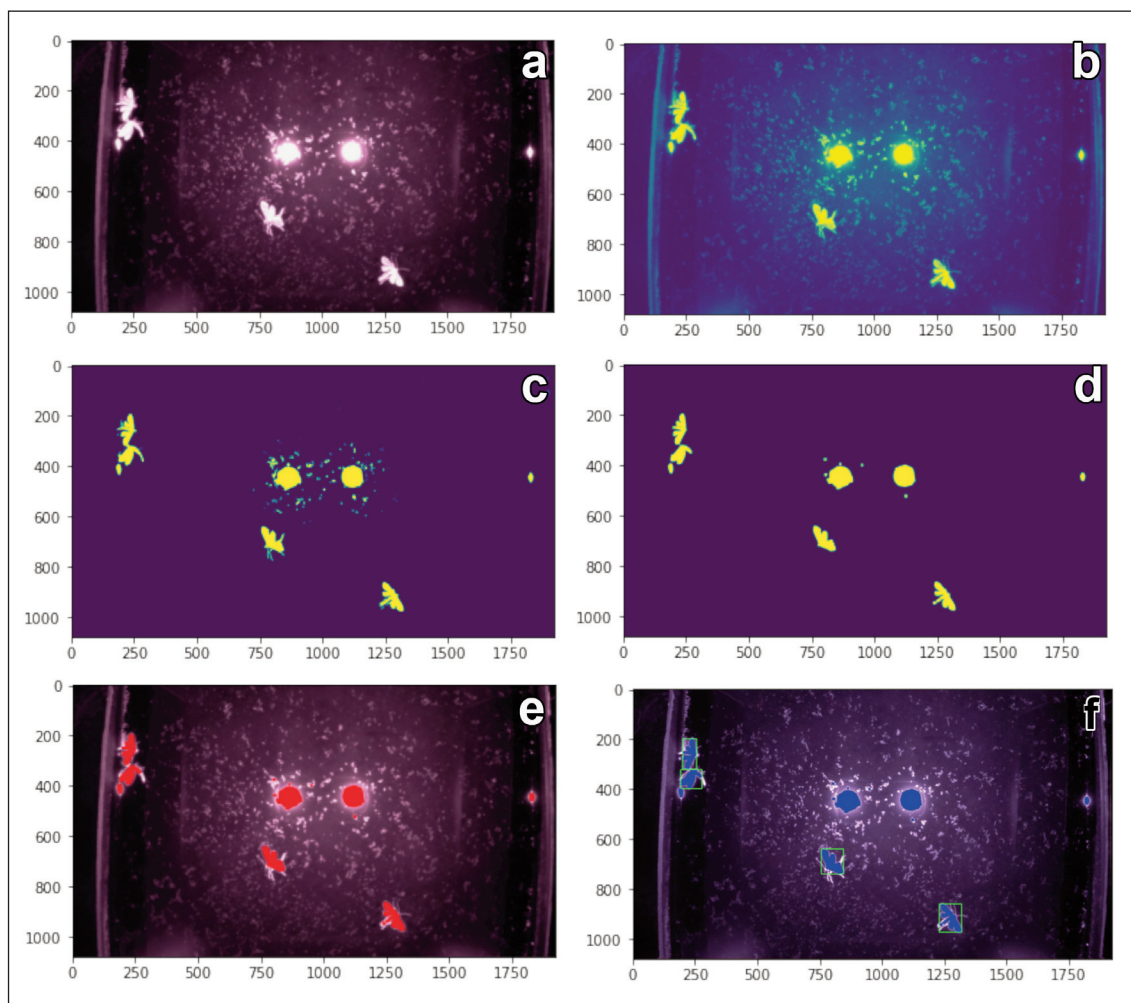


Figura 5. Ejemplo del análisis y procesamiento de imágenes aplicado en el monitoreo de *Duponchelia fovealis* Zeller (Lepidoptera: Crambidae) (Rodríguez-Vázquez et al., 2024) a partir de un sistema estacionario.
 Figure 5. Example of image analysis and processing applied to the monitoring of *Duponchelia fovealis* Zeller (Lepidoptera: Crambidae) (Rodríguez-Vázquez et al., 2024) using a stationary system.

(2013) reportan un promedio de 15 min por sitio de muestreo mediante métodos de búsqueda directa convencional, de especímenes identificados como adultos, ninfas y huevos de *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae), mientras que Monzo et al. (2015) compararon el tiempo de muestreo del psílido asiático de los cítricos, *Diaphorina citri* Kuwa-

yama (Hemiptera: Liviidae), en trampa pegajosa, gastado en promedio 8 min en realizar dicha actividad por punto de muestreo. Como se puede observar, esta actividad requiere de un desfase de tiempo, lo que cambia en la percepción real de lo que sucede simultáneamente en los puntos de muestreo que se contemplan en grandes extensiones.

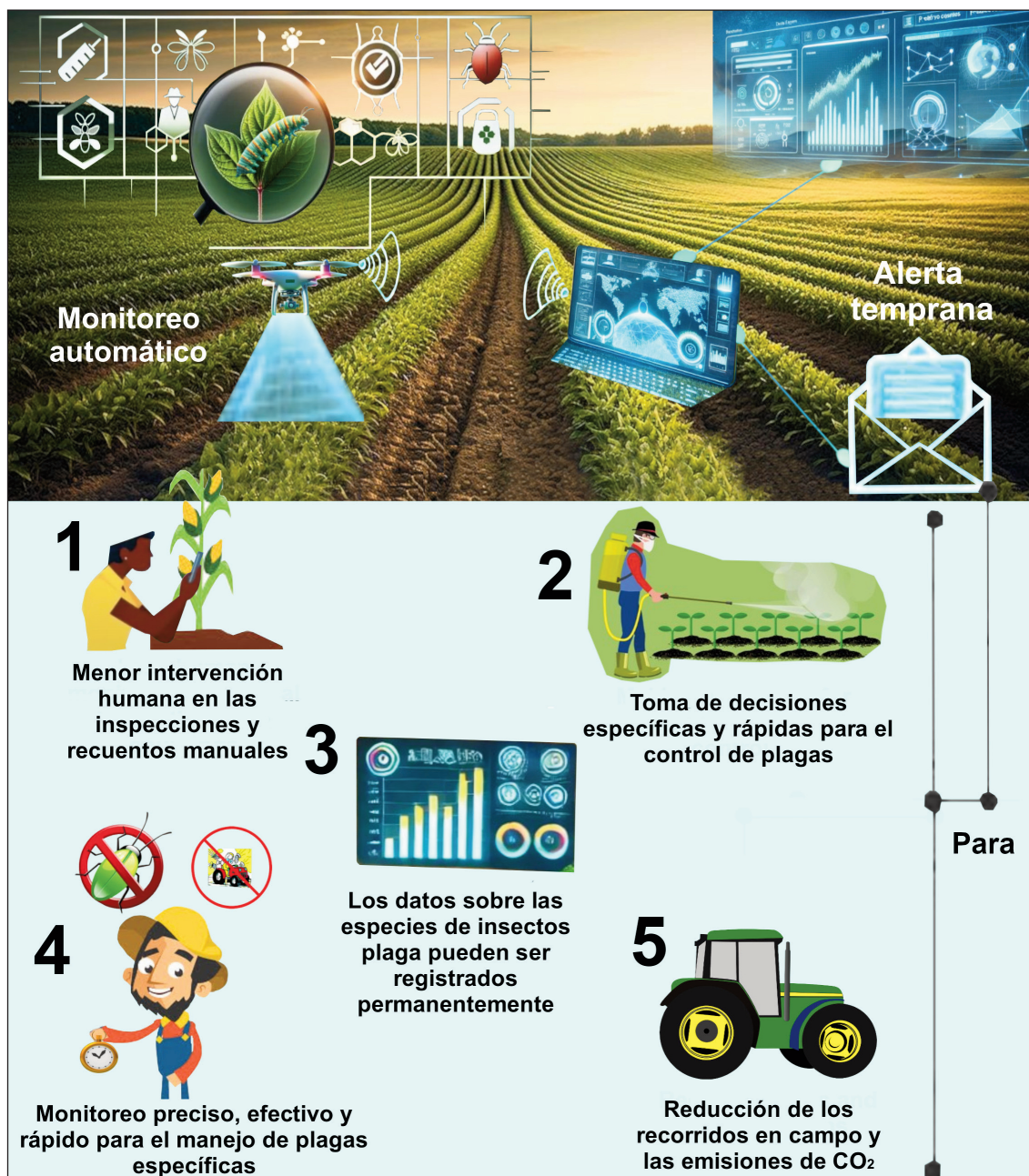


Figura 6. Efectividad de los dispositivos automáticos de monitoreo en la alerta temprana de insectos plaga. Fuente: Elaboración de los autores.
 Figure 6. Effectiveness of automatic monitoring devices in the early warning of pest insects. Source: Authors' own elaboration.

Si bien el monitoreo se lleva a cabo por un diagnóstico experto, en las primeras etapas de infestación es un reto y es indispensable la implementación de avances tecnológicos que ofrezcan una mayor disponibilidad de datos de manera continua y oportuna (Luo et al., 2023). La implementación de tecnologías como las que se han mencionado anteriormente, brinda una solución en cuanto a las necesidades de muestreo en un agroecosistema, ya que recopilan, procesan y analizan los datos que brindan información para la toma de decisiones en tiempos cortos.

Limitaciones del monitoreo automático en insectos plaga

El hecho de que la captura de insectos plaga mediante la implementación de trampas debe adaptarse a la especie que se desea monitorizar (Prete et al., 2021) supone una limitación en el desarrollo de modelos estándar que permitan ser aplicados para cualquier especie y para cualquier cultivo. Actualmente, los sistemas creados se implementan según el comportamiento y actividad (voladores o rastrojeros) de la especie que se desea identificar. En el caso de trampas cuyos métodos de captura no son específicos, un cierto número de organismos colectados corresponde a especies no objetivo que, por lo general, son descartadas del monitoreo y se vuelve intrascendente su identificación. La limitante en este sentido radica en que, al no considerar estas capturas incidentales, se pierde también información que permita ampliar el alcance y la utilidad de los sistemas de vigilancia de insectos plaga (Keasar et al., 2024).

También es importante considerar la creación de bases de datos sólidas y unificadas en cuanto a su obtención (Teixeira et al., 2023), con ello podría garantizarse el desarrollo de

modelos de identificación más específicos. Generalmente, los sistemas creados utilizan bases de datos que son muy variables al momento de establecer características que permitan obtener una identificación efectiva.

Otra limitante de estos dispositivos es la inexistencia de entomólogos especializados en computación o ingenieros en desarrollo computacional/electrónico especializados en entomología. Por esta razón, es importante considerar la creación de equipos multidisciplinarios que puedan desarrollar sistemas capaces de brindar una mayor precisión en la identificación. Finalmente, hay que considerar el elevado precio de adquisición de este tipo de dispositivos utilizados en el monitoreo automático en insectos plaga, siendo objeto de esta revisión, la descripción de los más representativos en cuanto a términos prácticos y metodológicos.

Desafíos y futuro

A pesar de las grandes ventajas que proporcionan los sistemas automáticos de monitoreo, existen diversos retos que afrontar para la adopción de esta tecnología, como su elevado costo inicial de implementación y la específica capacitación de quienes ejecutan esta actividad. Afortunadamente, el avance tecnológico está permitiendo abaratar los costes de producción y simplificar el manejo de estos sistemas.

En el futuro, se puede esperar una mayor integración de este tipo de tecnologías enfocadas en el monitoreo de insectos plaga, lo que contribuirá a la sostenibilidad, eficiencia y la disminución de productos nocivos tanto para la población como para el medio ambiente, que perjudica considerablemente al agroecosistema.

Conclusiones

Este trabajo presentó una revisión sobre investigaciones publicadas sobre la implementación de alternativas tecnológicas en la agricultura para la detección de plagas.

Los sistemas automáticos de monitoreo representan una revolución en la detección temprana de plagas en la agricultura. Estos avances tecnológicos aportan información más rápida y precisa, lo que se traduce en un beneficio tanto económico para los agricultores, por la disminución de la aplicación indiscriminada de pesticidas, como para el medio ambiente, por la misma situación. Por lo que su pronta adopción dentro de las actividades agrícolas cotidianas en un MIP es un paso importante para un futuro agrícola más eficiente.

Declaración de autoría

- Edgar Rodríguez-Vázquez: conceptualización, investigación, supervisión y redacción-borrador original.
- Mónica Hernández-Rodríguez: conceptualización, análisis formal, revisión y edición.
- Luis Alberto Aguirre-Urbe: redacción y supervisión.
- Epifanio Castro-del Ángel: redacción y supervisión.
- Francisco Marcelo Lara-Viveros: conceptualización, análisis formal, revisión y edición.
- Agustín Hernández-Juárez: Adquisición de fondos, conceptualización, análisis formal, revisión y edición.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca de doctorado otorgada al primer autor. A la

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el financiamiento a través del proyecto 436 y al Centro de Investigación en Química Aplicada por el financiamiento a través del proyecto interno 6706.

Referencias bibliográficas

- Abioye E.A., Abidin M.S.Z., Mahmud M.S.A., Buyamin S., Ishak M.H.I., Rahman M.K.I.A., Otuoze A.O., Onotu P., Ramli M.S.A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 173: 105441. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>
- Ali M.A., Dong L., Dhau J., Khosla A., Kaushik A. (2020). Perspective-electrochemical sensors for soil quality assessment. *Journal of The Electrochemical Society* 167(3): 037550. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab69fehttps://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ab69fe/meta>
- Almryad A.S., Kutucu H. (2020). Automatic identification for field butterflies by convolutional neural networks. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23(1): 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.01.006>
- Alsayaydeh J.A., Yusof M., Magenthiran M.S., Hamzah R.A., Mustaffa I., Herawan S.G. (2024). Empowering crop cultivation: harnessing internet of things for smart agriculture monitoring. *International Journal of Electrical y Computer Engineering* 14(5): 6023-6035. <http://doi.org/10.11591/ijece.v14i5.pp6023-6035>
- Araújo S.O., Peres R.S., Barata J., Lidon F., Ramalho J.C. (2021). Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy* 11(4): 667. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>
- Arif M.J., Gogi M.D., Sufyan M., Nawas A., Sarfraz R.M. (2017). Chapter 2. principles of insect pest management. En: *Sustainable Insect Pest Management* (Ed. Arif M.J, Foster J.E., Molina-Ochoa J.), pp. 17-47.

- Ayan E., Erbay H., Varçin F. (2020). Crop pest classification with a genetic algorithm-based weighted ensemble of deep convolutional neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 179: 105809. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105809>
- Barbedo J.G.A. (2020). Detecting and classifying pests in crops using proximal images and machine learning: A Review. *AI* 1(2): 312-328. <https://doi.org/10.3390/ai1020021>
- Bashir M.A., Alvi A.M., Naz H. (2014). Effectiveness of sticky traps in monitoring of insects. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences* 1: 5.
- Billa P., Venkatesh K., Sai J.V., Lohith K., Kumar A.S. (2023). Effective monitoring and protecting system for agriculture farming using IoT and raspberry pi. *Materials Today: Proceedings*, 80: 2917-2920. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.065>
- Cai J., Xu Q., Cao M., Yang B. (2019). A novel importance sampling method of power system reliability assessment considering multi-state units and correlation between wind speed and load. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 109: 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.019>
- Chavas J.P., Nauges C. (2020). Uncertainty, learning, and technology adoption in agriculture. *Applied Economic Perspectives and Policy* 42(1): 42-53. <https://doi.org/10.1002/aep.13003>
- Chen H., Yada R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development. *Trends in Food Science and Technology* 22(11): 585-594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.004>
- Čirjak D., Miklečić I., Lemić D., Kos T., Živković I.P. (2022). Automatic pest monitoring systems in apple production under changing climatic conditions. *Horticulturae* 8(6): 520. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060520>
- Cisternas I., Velásquez I., Caro A., Rodríguez A. (2020). Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 176: 105626. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
- Condotta I.C., Brown-Brandl T.M., Pitla S.K., Stinn J.P., Silva-Miranda K.O. (2020). Evaluation of low-cost depth cameras for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 173: 105394. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105394>
- Dankhara F., Patel K., Doshi N. (2019). Analysis of robust weed detection techniques based on the internet of things (IoT). *Procedia Computer Science* 160: 696-701. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.025>
- Das P.P., Singh K.R., Nagpure G., Mansoori A., Singh R.P., Ghazi I.A., Kumar A., Singh J. (2022). Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research* 214: 113821. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113821>
- Das N., Haloi D. (2024). Chapter: 3 cutting-edge integrated pest management for sustainable horticulture. En: *Frontiers in Horticulture Sustainability Vol. 2* 2nd ed. (Eds. Pathakakula S., Ramadevi V., Parkavi, Karthika A., Ragul P., Haokip S.W.), pp. 17-37. Ninetales Publishings.
- Dara S.K. (2019). The new integrated pest management paradigm for the modern age. *Journal of Integrated Pest Management* 10(1): 12. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz010>
- De Simone M.C., Rivera Z.B., Guida D. (2018). Obstacle avoidance system for unmanned ground vehicles by using ultrasonic sensors. *Machines* 6(2): 18. <https://doi.org/10.3390/machines6020018>
- Donati C., Mammarella M., Comba L., Biglia A., Gay P., Dabbene F. (2022). 3D distance filter for the autonomous navigation of UAVs in agricultural scenarios. *Remote Sensing* 14(6): 1374. <https://doi.org/10.3390/rs14061374>
- Espinoza K., Valera D.L., Torres J.A., López A., Molina-Aiz F.D. (2016). Combination of image processing and artificial neural networks as a novel approach for the identification of *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* on sticky traps in greenhouse agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 127: 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.008>
- Farooq M.S., Riaz S., Abid A., Umer T., Zikria Y.B. (2020). Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics* 9(2): 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>

- Flórián N., Jósваи J.K., Tóth Z., Gergócs V., Sipőcz L., Tóth M., Dombos M. (2023). Automatic detection of moths (Lepidoptera) with a funnel trap prototype. *Insects* 14(4): 381. <https://doi.org/10.3390/insects14040381>
- Garg S., Rumjit N.P., Roy S. (2023). Smart agriculture and nanotechnology: Technology, challenges, and new perspective. *Advanced Agrochem* 3(2): 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2023.11.001>
- Gondchawar N., Kawitkar R.S. (2016). IoT based smart agriculture. *International Journal of advanced research in Computer and Communication Engineering*, 5(6), 838-842.
- Guarnieri A., Maini S., Molari G., Rondelli V. (2011). Automatic trap for moth detection in integrated pest management. *Bulletin of Insectology* 64(2): 247-251.
- Gupta S.D., Ibaraki Y. (2014). *Plant Image Analysis Fundamentals and Applications*. CRC Press. 398 pp. <https://doi.org/10.1201/b17441>
- Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *Journal of Industrial Integration and Management* 7(1): 83-111. <https://doi.org/10.1142/S2424862221300040>
- Javaid M., Haleem A., Khan I.H., Suman R. (2023). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in agriculture sector. *Advanced Agrochem* 2(1): 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001>
- Jiang J.A., Tseng C.L., Lu F.M., Yang E.C., Wu Z.S., Chen C.P., Lin S.H., Lin K.C., Liao C.S. (2008). A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Computers and Electronics in Agriculture* 62(2): 243-259. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.005>
- Keasar T., Yair M., Gottlieb D., Cabra-Leykin L., Keasar C. (2024). STARdbi: A pipeline and database for insect monitoring based on automated image analysis. *Ecological Informatics* 80: 102521. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102521>
- Khan A.A., Makmud M.Z.H., Miskon M.T., Nair A., Bidin K. (2024). Development of a weather station using IoT platform based Arduino integrated with a control system for smart agriculture applications. *IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems*, 29 junio, Shah Alam, Malaysia, pp. 134-138. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS61270.2024.10649832>
- Khanal S., Fulton J., Shearer S. (2017). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*. 139: 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>
- Laktionov I., Diachenko G., Kashtan V., Vizniuk A., Gorev V., Khabarлак K., Shedlovska Y. (2024). A comprehensive review of recent approaches and hardware-software technologies for digitalisation and intellectualisation of open-field crop production: Ukrainian case study in the global context. *Computers and Electronics in Agriculture* 225: 109326. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109326>
- Leybourne D.J., Musa N., Yang P. (2024). Can artificial intelligence be integrated into pest monitoring schemes to help achieve sustainable agriculture? An entomological, management and computational perspective. *Agricultural and Forest Entomology* 27: 8-17. <https://doi.org/10.1111/afe.12630>
- Li D., Song Z., Quan C., Xu X., Liu C. (2021). Recent advances in image fusion technology in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 191: 106491. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106491>
- Lima M.C.F., Leandro M.E.D. de A., Valero C., Coronel L.C.P., Bazzo C.O.G. (2020). Automatic detection and monitoring of insect pests-A review. *Agriculture* 10(5): 161. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050161>
- Liu T., Chen W., Wu W., Sun C., Guo W., Zhu X. (2016). Detection of aphids in wheat fields using a computer vision technique. *Biosystems Engineering* 141: 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.005>
- Liu H., Lee S. H., Chahl J.S. (2017). A review of recent sensing technologies to detect invertebrates on crops. *Precision Agriculture* 18(4): 635-666. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9473-6>

- Liu H., Chahl J.S. (2018). A multispectral machine vision system for invertebrate detection on green leaves. *Computers and Electronics in Agriculture* 150: 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.002>
- Luo Y., Huang H., Roques A. (2023). Early monitoring of forest wood-boring pests with remote sensing. *Annual Review of Entomology* 68: 277-298. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120220-125410>
- Mahore V., Soni P., Patidar P., Nagar H., Chouriya A., Machavaram R. (2024). Development and implementation of a raspberry Pi-based IoT system for real-time performance monitoring of an instrumented tractor. *Smart Agricultural Technology* 9: 100530. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100530>
- Marsland S. (2011). *Machine learning: an algorithmic perspective* 1st Ed. Chapman and Hall/CRC. 406 pp. <https://doi.org/10.1201/9781420067194>
- Meshram V., Patil K., Meshram V., Hanchate D., Ramkteke S.D. (2021). Machine learning in agriculture domain: A state-of-art survey. *Artificial Intelligence in the Life Sciences* 1: 100010. <https://doi.org/10.1016/j.aills.2021.100010>
- Moerkens R., Brenard N., Bosmans L., Reybroeck E., Janssen D., Hemming J., Sluydts V. (2019). Protocol for semi-automatic identification of whiteflies *Bemisia tabaci* and *Trialeurodes vaporariorum* on yellow sticky traps. *Journal of Applied Entomology* 143(6): 652-658. <https://doi.org/10.1111/jen.12630>
- Monzo C., Arevalo H.A., Jones M.M., Vanaclocha P., Croxton S.D., Qureshi J.A., Stansly P.A. (2015). Sampling methods for detection and monitoring of the Asian citrus psyllid (Hemiptera: Psyllidae). *Environmental Entomology* 44(3): 780-788. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv032>
- Mora-Aguilera G., Acevedo-Sánchez G., Guzmán-Hernández E., Flores-Colorado O.E., Coria-Contreras J.J., Mendoza-Ramos C., Martínez-Bustamante V.I., López-Buenfil A., González-Gómez R., Javier-López M.Á. (2021). Web-based epidemiological surveillance systems and applications to coffee rust disease. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology* 39(3): 452-492. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-6>
- Morchid A., El Alami R., Raezah A.A., Sabbar Y. (2024). Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural Sustainability: Benefits and challenges. *Ain Shams Engineering Journal* 15(3): 102509. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102509>
- Ojha T., Misra S., Raghuvanshi N.S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and electronics in agriculture* 118: 66-84. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011>
- Paul K., Chatterjee S.S., Pai P., Varshney A., Juikar S., Prasad V., Bhadra B., Dasgupta S. (2022). Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 198: 107096. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107096>
- Patrício D.I., Rieder R. (2018). Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and electronics in agriculture* 153: 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001>
- Pereira G.P., Chari M.Z., Daroge F. (2023). IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. *IoT* 4(3): 221-243. <https://doi.org/10.3390/iot4030012>
- Preti M., Verheggen F., Angeli S. (2021). Insect pest monitoring with camera-equipped traps: strengths and limitations. *Journal of Pest Science* 94(2): 203-217. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01309-4>
- Potamitis I., Ganchev T., Kontodimas D. (2009). On automatic bioacoustic detection of pests: The cases of *Rhynchophorus ferrugineus* and *Sitophilus oryzae*. *Journal of Economic Entomology* 102(4): 1681-1690. <https://academic.oup.com/jee/article/102/4/1681/2199295>
- Qiao M., Lim J., Ji C.W., Chung B.K., Kim H.Y., Uhm K.B., Myung C.S., Cho J., Chon T.S. (2008). Density estimation of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in a greenhouse using sticky traps in conjunction with an image processing system. *Journal of Asia-Pacific Entomology* 11(1): 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2008.03.002>

- Rajalakshmi P., Devi Mahalakshmi S. (2016). IOT based crop-field monitoring and irrigation automation. 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 7-8 enero, Coimbatore, India, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISCO.2016.7726900>
- Rajak P., Ganguly A., Adhikary S., Bhattacharya S. (2023). Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research* 14: 100776. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>
- Reynolds D.R., Riley J.R. (2002). Remote-sensing, telemetric and computer-based technologies for investigating insect movement: a survey of existing and potential techniques. *Computers and electronics in agriculture* 35(2-3): 271-307. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00023-6)
- Rivera A., Ponce P., Mata O., Molina A., Meier A. (2023). Local weather station design and development for cost-effective environmental monitoring and real-time data sharing. *Sensors* 23(22): 9060. <https://doi.org/10.3390/s23229060>
- Rodríguez-Vázquez E., Hernández-Juárez A., Reyes-Rosas A., Illescas-Riquelme C.P., Lara-Viveros F.M. (2024). Detection and early warning of *Duponchelia fovealis* Zeller (Lepidoptera: Crambidae) using an automatic monitoring system. *AgriEngineering* 6(4): 3785-3798. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040216>
- Rustia D.J.A., Lin C.E., Chung J.Y., Zhuang Y.J., Hsu J.C., Lin T.T. (2020). Application of an image and environmental sensor network for automated greenhouse insect pest monitoring. *Journal of Asia-Pacific Entomology* 23(1): 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.11.006>
- Rustia D.J.A., Lin T.T. (2017). An IoT-based wireless imaging and sensor node system for remote greenhouse pest monitoring. *Chemical Engineering Transactions* 58: 601-606. <https://doi.org/10.3303/CET1758101>
- Sharma K., Shivandu S.K. (2024). Integrating Artificial Intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors International* 5: 100292. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292>
- She J., Zhan W., Hong S., Min C., Dong T., Huang H., He Z. (2022). A method for automatic real-time detection and counting of fruit fly pests in orchards by trap bottles via convolutional neural network with attention mechanism added. *Ecological Informatics* 70: 101690. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101690>
- Singh R.K. Naresh P.K.S., Kumar A., Kumar L., Chandra S.M., Shivangi, Ahlawat P. (2021). Role of IoT technology in agriculture for reshaping the future of farming in India: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 10(2): 439-451. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1002.052>
- Singh R.P. (2021). Recent trends, prospects, and challenges of nanobiosensors in agriculture. *En Biosensors in Agriculture: Recent Trends and Future Perspectives* (Ed. Pudake R.N, Jain U., Kole Ch.), pp. 3-13. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66165-6_1
- Solis-Sánchez L.O., Castañeda-Miranda R., García-Escalante J.J., Torres-Pacheco I., Guevara-González R.G., Castañeda-Miranda C.L., Alaniz-Lumbreras P.D. (2011). Scale invariant feature approach for insect monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1): 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.001>
- Subeesh A., Mehta C.R. (2021). Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. *Artificial Intelligence in Agriculture* 5: 278-291. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2021.11.004>
- Sütő J. (2021). Embedded system based sticky paper trap with deep learning based insect counting algorithm. *Electronics* 10(15): 1754. <https://doi.org/10.3390/electronics10151754>
- Thangalakshmi S., Ramanujan R. (2015). Electronic trapping and monitoring of insect pests troubling agricultural fields. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology* 3(8): 206-2013
- Telikani A., Tahmassebi A., Banzhaf W., Gandomi A.H. (2021). Evolutionary machine learning: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 54(8): 1-35. <https://doi.org/10.1145/3467477>

- Teixeira A.C., Ribeiro J., Morais R., Sousa J.J., Cunha A. (2023). A systematic review on automatic insect detection using deep learning. *Agriculture* 13(3): 713. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030713>
- Tian H., Wang T., Liu Y., Qiao X., Li Y. (2020). Computer vision technology in agricultural automation –A review. *Information Processing in Agriculture* 7(1): 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006>
- Türkoğlu M., Hanbay D. (2019). Plant disease and pest detection using deep learning-based features. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 27(3): 1636-1651. <https://doi.org/10.3906/elk-1809-181>.
- Upadhyay A., Zhang Y., Koparan C., Rai N., Howatt K., Bajwa S., Sun X. (2024). Advances in ground robotic technologies for site-specific weed management in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 225: 109363. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109363>
- Wang F., Wang R., Xie C., Zhang J., Li R., Liu L. (2021). Convolutional neural network based automatic pest monitoring system using handheld mobile image analysis towards non-site-specific wild environment. *Computers and Electronics in Agriculture* 187: 106268. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106268>
- Yang C., Westbrook J.K., Suh C.P.C., Martin D.E., Hoffmann W.C., Lan Y., Bradley F.K., Goolsby J.A. (2014). An airborne multispectral imaging system based on two consumer-grade cameras for agricultural remote sensing. *Remote Sensing* 6(6): 5257-5278. <https://doi.org/10.3390/rs6065257>
- Yen A.L., Madge D.G., Berry N.A., Yen J.D.L. (2013). Evaluating the effectiveness of five sampling methods for detection of the tomato potato psyllid, *Bactericera cockerelli* (Šulc) (Hemiptera: Psylloidea: Triozidae). *Australian Journal of Entomology* 52(2): 168-174. <https://doi.org/10.1111/aen.12006>
- Yi Hang., Wen Desheng., Sandhu P.S. (2010). Proceedings 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, July 9-11, Chengdu, China. IEEE.
- Yu S., Liu X., Tan Q., Wang Z., Zhang B. (2024). Sensors, systems and algorithms of 3D reconstruction for smart agriculture and precision farming: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 224: 109229. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109229>
- Zamora-Izquierdo M.A., Santa J., Martínez J.A., Martínez V., Skarmeta A.F. (2019). Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosystems Engineering* 177: 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014>
- Zhai Z., Martínez J.F., Beltran V., Martínez N.L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture* 170: 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- Zhang W., Kato E., Bianchi F., Bhandary P., Gort G., van der Werf W. (2018). Farmers' perceptions of crop pest severity in Nigeria are associated with landscape, agronomic and socio-economic factors. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 259: 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.03.004>
- Zhong Y., Gao J., Lei Q., Zhou Y. (2018). A vision-based counting and recognition system for flying insects in intelligent agriculture. *Sensors* 18(5): 1489. <https://doi.org/10.3390/s18051489>

(Aceptado para publicación el 15 de octubre de 2025)

La fertilización foliar como potencial herramienta de manejo para el control de *Phytophthora citrophthora* en cítricos

Aurora Moreno-Lora*, Ana Aguado y Francisco J. Arenas-Arenas

Centro IFAPA Las Torres, Ctra. Sevilla-Cazalla Km 12.2, 41200, Sevilla.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto antifúngico de un fertilizante foliar a base de cobre, zinc y azufre, sobre el crecimiento de *Phytophthora citrophthora* en medio de cultivo PDA y condiciones controladas, frente a un fungicida comercial a base de cobre y a un tratamiento con azufre. Para ello, se prepararon medios "envenenados" con el fertilizante a diferentes dosis (2, 3 y 4 cm³ L⁻¹), y con el fungicida (2,5 cm³ L⁻¹), como control negativo. También se incluyó un control positivo (sin tratamiento) y tres dosis de azufre (74,4; 111,6 y 148,8 mg L⁻¹). Los medios se vertieron en placas Petri y se inocularon con micelio de *P. citrophthora*. A los 7 y 15 días después de la inoculación, se determinó el radio de crecimiento del micelio en las placas y se calculó el porcentaje de inhibición respecto al control positivo. El crecimiento del micelio fue menor en el medio fertilizado en comparación con el control positivo, mostrando una reducción significativa conforme al incremento de la concentración de fertilizante en el medio. De forma similar, el porcentaje de inhibición del crecimiento aumentó conforme a la dosis de fertilizante aplicada. A pesar de ello, no se observó un efecto fungicida con la aplicación del fertilizante. Los resultados mostraron que la aplicación del fertilizante tiene un efecto fungistático sobre el crecimiento de *P. citrophthora* en condiciones controladas. Esto sugiere que la fertilización foliar podría constituir una estrategia complementaria en el manejo integrado de enfermedades causadas por *Phytophthora* spp.

Palabras clave: Fungicida, fungistático, cobre, aguado, gomosis, podredumbre.

Foliar fertilization as a potential management tool for controlling *Phytophthora citrophthora* in citrus

Abstract

The objective of this study was to evaluate the antifungal effect of a copper, zinc, and sulphur-based foliar fertilizer on the growth of *Phytophthora citrophthora* in PDA culture medium under controlled conditions, and to compare it with a commercial copper-based fungicide and a sulphur treatment. To this end, "poisoned" media were prepared by adding the fertilizer at different doses (2, 3, and 4 cm³ L⁻¹), and the fungicide (2.5 cm³ L⁻¹) was used as a negative control. A positive control (untreated) and three sulphur doses (74.4, 111.6, and 148.8 mg L⁻¹) were also included. The media were poured into Petri dishes before being inoculated with *P. citrophthora* mycelium. Seven and fifteen days after inoculation,

* Autor para correspondencia: aurora.moreno.lora@juntadeandalucia.es

Cita del artículo: Moreno-Lora A., Aguado A., Arenas-Arenas F.J. (2025). La fertilización foliar como potencial herramienta de manejo para el control de *Phytophthora citrophthora* en cítricos. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 121(4): 354-367. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.012>



the mycelial growth radio on the plates was determined, and the percentage of inhibition was calculated relative to the positive control. Mycelial growth was lower in the fertilized medium compared to the positive control, exhibiting a significant reduction with increasing fertilizer concentration in the medium. Similarly, the percentage of growth inhibition increased with increasing applied dose. Despite of this, no fungicidal effect was observed with the application of the fertilizer. The results showed that fertilizer application had a fungistatic effect on the growth of *P. citrophthora* under controlled conditions. This suggests that foliar fertilization could be a complementary strategy in the integrated management of diseases caused by *Phytophthora* spp.

Keywords: Fungicide, fungistatic, copper, brown rot, gummosis, rot.

Introducción

Uno de los principales problemas fitosanitarios en los cítricos es la incidencia de *Phytophthora* spp. (Tuset, 1995). Este oomiceto puede causar diversas enfermedades, como la caída de plántulas en viveros o “damping off”, la podredumbre de raíces, la podredumbre del pie o gomosis, y el aguado de frutos (Erwin y Ribeiro, 1996; Duran-Vila y Moreno, 2000; Vicent y Tuset, 2013). Aunque se encuentra fundamentalmente en el suelo, en forma de micelio o de estructura de resistencia (oosporas y clamidosporas), cuando las condiciones climáticas son favorables para su desarrollo (elevada humedad y temperatura suave) produce esporangios y libera zoosporas (Tuset et al., 1990). Las zoosporas son estructuras infectivas que se ven atraídas por los exudados radiculares y, una vez que entran en contacto con la raíz, infectan el tejido produciendo podredumbre. Estas zoosporas se mueven a través del agua, por lo que pueden ser transportadas a grandes distancias por efecto de las lluvias y los riegos abundantes, llegando a infectar el tronco y los frutos (Erwin et al., 1983; Matheron y Matejka, 1993). El ciclo se repite tantas veces como las condiciones climáticas sean favorables y los tejidos susceptibles (Graham y Menge, 1999).

En la cuenca mediterránea, *P. citrophthora* es la principal especie causante del aguado y la gomosis de los cítricos (Graham et al., 1998). Su control puede ser difícil y costoso ya que

puede desarrollar resistencia a los fungicidas sistémicos, y los productos de contacto a base de cobre parecen ofrecer únicamente una acción preventiva (Vicent y Tuset, 2013). No obstante, algunos estudios señalan que la aplicación foliar de micronutrientes, especialmente de cobre y zinc, puede ser efectiva en la reducción de *P. infestans* en patata (Trehan et al., 1995). En ese sentido, los compuestos de óxido de cobre parecen tener más eficacia que el sulfato de cobre (Henderson, 1945), aunque este último presenta una acción protectora frente a la infección cuando se aplica como una solución diluida (Halsall, 1977). Por ello, cabe suponer que la aplicación foliar de un fertilizante a base de cobre, zinc y azufre podría contribuir a reducir el crecimiento de *P. citrophthora* en los cítricos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto antifúngico de un fertilizante foliar a base de cobre, zinc y azufre sobre el crecimiento de *P. citrophthora* en medio de cultivo PDA y condiciones controladas, frente a un fungicida comercial en base a cobre.

Material y métodos

Aislado de Phytophthora citrophthora

El aislado de *P. citrophthora* (nº de la cepa 23/078) fue suministrado por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) y cultivado en placas con medio de Patata Dex-

trosa Agar PDA (39 g L^{-1}) que se refrescaron, al menos, cada 30 días. Para incrementar su virulencia frente a cítricos (Huang et al., 2019), se tomaron seis botones de PDA inoculados y se colocaron sobre la superficie de un fruto de naranja, previamente desinfectada con lejía. Se colocó en un recipiente estéril con gasas húmedas y se dejó crecer durante 7 días. Una vez que se observó crecimiento de micelio, se recogieron trozos de tejido sintomático y se colocaron de nuevo en placas con PDA. Las placas se mantuvieron en cámara de cultivo a $28 \text{ }^\circ\text{C}$ en oscuridad.

Diseño experimental

Ensayo 1: Efecto del cobre

La evaluación del efecto antifúngico del fertilizante (Elicimem zynergy, Ibermem) se realizó a tres dosis; $2 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$, $3 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ y $4 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$, mientras que el producto fungicida se aplicó a su dosis comercial; $2,5 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ (Inacop L, Sipcam Iberia). La composición del fertilizante (p/v) fue de 2,66 %, 4,72 % y 9,10 % de cobre, zinc y trióxido de azufre, respectivamente, y del fungicida comercial del 38 % (p/v) de oxiclورو de cobre. Se incluyó un control sin tratar para conocer el crecimiento natural de *P. citrophthora* en placa.

Se establecieron los siguientes tratamientos:

- T1. Control sin tratamiento (control positivo).
- T2. Fertilizante foliar a dosis baja ($2 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$; equivalente a 53,2 mg Cu).
- T3. Fertilizante foliar a dosis media ($3 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$; equivalente a 79,8 mg Cu).
- T4. Fertilizante foliar a dosis alta ($4 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$; equivalente a 106,4 mg Cu).
- T5. Fungicida a dosis comercial ($2,5 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$; equivalente a 565,3 mg Cu) (control negativo).

El diseño experimental de este primer ensayo incluyó, por tanto, 5 tratamientos con 5 repeticiones (una placa por repetición) de cada uno ($n = 25$), distribuidos aleatoriamente dentro de la cámara de cultivo.

Ensayo 2: Efecto del cobre y el azufre

El mismo diseño se utilizó para un segundo ensayo en el que se incluyeron, además de los tratamientos anteriores, tres nuevos tratamientos de azufre (98 % p/p); T6 ($74,4 \text{ mg L}^{-1}$), T7 ($111,6 \text{ mg L}^{-1}$) y T8 ($148,8 \text{ mg L}^{-1}$) cuya concentración era equivalente a la de azufre en los tratamientos T2, T3 y T4, respectivamente. En total se incluyeron 8 tratamientos con 6 repeticiones de cada uno, distribuidos al azar. Este segundo ensayo se repitió por triplicado (bloques I, II y III), empleándose un total de 144 placas.

Condiciones de crecimiento

Los tratamientos se mezclaron con el medio de cultivo PDA autoclavado justo antes de ser vertidos en las placas, por lo que se prepararon medios “envenenados” a las distintas dosis. Para la inoculación de *P. citrophthora* se tomó un disco de unos 6 mm de PDA con micelio de 15 días de crecimiento y se colocó en el centro de cada placa. El mismo procedimiento se siguió para el tratamiento control, empleándose PDA sin tratar. Las placas se sellaron con parafilm y se mantuvieron en cámara de cultivo en las condiciones descritas anteriormente.

Evaluación del efecto antifúngico de los tratamientos

Para evaluar el efecto antifúngico de los tratamientos, se determinó el radio de crecimiento y el porcentaje de inhibición del crecimiento en cada placa, según Sale et al. (2021).

El radio de crecimiento (R) se obtuvo a partir de la media de dos medidas perpendiculares del diámetro que ocupa el micelio en la placa, menos el diámetro del disco, utilizando la siguiente fórmula:

$$R = [(D1 + D2) / 2] - D0 \quad [1]$$

Donde R es el ratio de crecimiento, D1 y D2 son los diámetros que ocupa el micelio en la placa, medidos en direcciones perpendiculares, y D0 es el diámetro del disco utilizado para el repicado (inoculación).

El porcentaje de inhibición del crecimiento, debido a los tratamientos, se obtuvo comparando el diámetro medio de crecimiento en las placas tratadas y control positivo:

$$I (\%) = [(Dc - Dt) / Dc] \times 100 \quad [2]$$

Donde I (%) es el porcentaje de inhibición del crecimiento, Dc es la media de los diámetros en las placas control positivo y Dt es la media de los diámetros en las placas tratadas.

Estas determinaciones se realizaron a los 7 y 15 días tras la inoculación de *P. citrophthora* (ddi).

Determinación del efecto fungicida o fungistático de los tratamientos

Transcurridos 7 ddi, se retiró el parafilm y se abrieron las placas, y se tomó una mitad del disco de PDA de 6 mm inicialmente utilizado para evaluar el efecto antifúngico de los tratamientos. Esta mitad se colocó sobre una placa con PDA sin tratamiento y se mantuvo en cámara de cultivo durante 7 días bajo las condiciones descritas anteriormente. Posteriormente, se observó la capacidad de crecimiento del aislado de *P. citrophthora* tras haber sido sometido a los diferentes tratamientos, y se determinó el efecto fungicida (eliminación por completo del patógeno) o fungistático (inhibición temporal y reversible de su crecimiento) de cada uno de ellos.

Análisis estadístico

El efecto de los tratamientos sobre el radio y el porcentaje de inhibición del crecimiento de *P. citrophthora* se evaluó a partir de un ANOVA simple en el ensayo 1 y del modelo lineal general (GLM) en el ensayo 2, utilizando el software Statgraphics 5.1 Plus (StatPoint, 2000). Previamente, se comprobaron los requisitos de normalidad y homocedasticidad del conjunto de datos según los test de Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. Para cumplir con estos requisitos, se realizaron transformaciones de las variables porcentuales aplicando el arcoseno (Lin y Xu, 2020). Cuando el efecto de los tratamientos fue significativo, se realizó una comparación de medias según el test de Tukey (HSD).

Resultados

Ensayo 1

El radio de crecimiento del micelio y el porcentaje de inhibición del desarrollo de *P. citrophthora* para los diferentes tratamientos se muestran en la Tabla 1. Se observó crecimiento de micelio en todas las placas control positivo (4/4) y en ninguna de las placas con fungicida (0/4), a los 7 ddi (Figura 1, izquierda) y a los 15 ddi (Figura 1, derecha). El radio de crecimiento del micelio fue significativamente menor en las placas fertilizadas respecto a las placas control positivo, independientemente de la dosis aplicada, tanto a los 7 como a los 15 ddi (Figura 1). No se observó crecimiento del micelio en las placas tratadas con el fungicida, como se ha mencionado anteriormente, por lo que el radio de crecimiento se consideró 0 para este tratamiento. El porcentaje de inhibición del crecimiento en las placas fertilizadas fue del 80-90 % a los 7 ddi y del 69,5-84,9 % a los 15 ddi, sin dife-

Tabla 1. Efecto de los tratamientos y las dosis aplicadas sobre el radio de crecimiento y el porcentaje de inhibición del crecimiento de *P. citrophthora* en placa (Ensayo 1).

Table 1. Effect of treatments and applied doses on the growth radio and growth inhibition percentage of *P. citrophthora* on plate (Trial 1).

Tratamiento	Dosis	Radio 7	Radio 15	Inhibición 7	Inhibición 15
	cm ³ L ⁻¹	mm		%	
Control		64,63a	77,75a		
Fertilizante	2	3,5b	16,0b	88,40	75,49
	3	7,75b	21,13b	83,19	69,49
	4	3,63b	9,63b	90,13	84,88
Fungicida	2,5	0*	0*	100	100
<i>p</i> -valor		0,0000	0,0052	0,1217	0,0976

Radio 7 y 15: radio de crecimiento a los 7 y 15 días desde la inoculación; Inhibición 7 y 15: porcentaje de inhibición del crecimiento a los 7 y 15 días desde la inoculación.

Los valores promedio seguidos de distinta letra superíndice en una misma columna indican diferencia estadísticamente significativa según el test de Tukey (HSD). n = 4.

* Los valores marcados con un asterisco no fueron incluidos en el test de comparación de medias. Se muestra el valor promedio de las repeticiones para ese tratamiento.

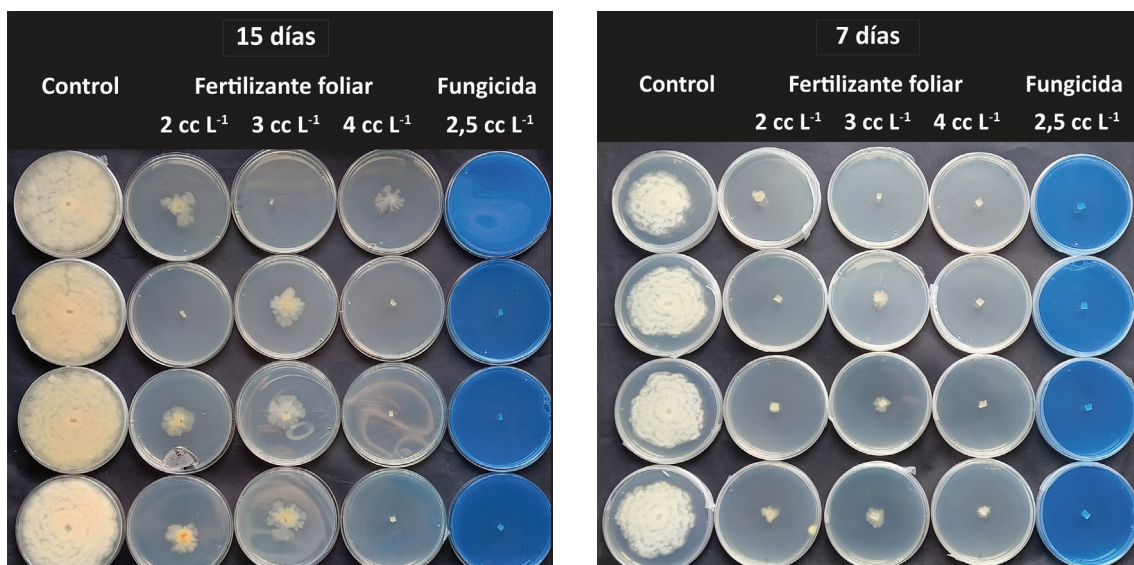


Figura 1. Detalle del crecimiento de *P. citrophthora* en placa, sobre PDA con los diferentes tratamientos, a los 7 (izquierda) y 15 (derecha) días tras la inoculación (Ensayo 1).

Figure 1. Detail of *P. citrophthora* growth on PDA plates under different treatments, at 7 (left) and 15 (right) days after inoculation (Trial 1).

rencias significativas entre las dosis estudiadas ni respecto al fungicida comercial, cuyo porcentaje de inhibición fue del 100 %, tanto a los 7 como a los 15 ddi.

Para determinar el efecto fungicida o fungistático de los tratamientos, se determinó la capacidad de crecimiento del micelio procedente de las placas tratadas, tras colocarse sobre PDA sin tratar (Figura 2). Se observó cre-

cimiento de micelio en todos los botones procedentes de las placas control positivo (5/5) y en ninguno de los procedentes de las placas con fungicida (0/5). En el caso de los botones procedentes de las placas fertilizadas, se observó crecimiento de micelio en 4/5 placas cuando provenían de dosis de 2 y 4 $\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$, y en 3/5 placas cuando provenían de la dosis de 3 $\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$ (Figura 2).



Figura 2. Detalle del crecimiento de *P. citrophthora* en placa sobre PDA sin tratar, a los 7 días tras la inoculación (Ensayo 1).
Figure 2. Detail of *P. citrophthora* growth on PDA plates without treatments, at 7 days after inoculation (Trial 1).

Ensayo 2

El micelio creció en todas las placas control positivo (18/18) y en las tratadas con azufre (18/18), independientemente de la dosis aplicada, mientras que en aquellas tratadas con fungicida no se observó crecimiento alguno

(0/18). El radio de crecimiento en las placas fertilizadas fue menor conforme al incremento de la concentración de fertilizante, tanto a los 7 como a los 15 ddi, mientras que en aquellas tratadas con azufre el crecimiento fue similar al control positivo. No obstante, dado que la interacción entre factores (*trata-*

miento \times bloque) resultó significativa (Tabla 2), el efecto de los tratamientos sobre el radio de crecimiento debe considerarse para cada bloque por separado. En el bloque I se observó un menor crecimiento del micelio en las placas fertilizadas respecto a las placas control a los 7 ddi, siendo el radio significativamente inferior a dosis de 3 y 4 $\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$ en comparación a 2 $\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$, mientras que los tratamientos de azufre no mostraron diferencias significativas con el control. En cambio, en los bloques II y III los tratamientos de azufre redujeron ligeramente el crecimiento del micelio, con in-

dependencia de la dosis aplicada, mientras que en las placas fertilizadas este crecimiento fue aún más reducido y significativamente menor conforme al incremento de la dosis de fertilizante (Figura 4, izquierda). El mismo efecto se observó a los 15 ddi (Figura 4, derecha) en todos los bloques.

El porcentaje de inhibición del crecimiento a los 7 ddi fue muy superior en las placas fertilizadas respecto a las tratadas con azufre, oscilando entre el 63,5 y 98,2 % a los 7 ddi y entre el 34,4 y 89,3 % a los 15 ddi (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de los tratamientos y las dosis aplicadas sobre el radio de crecimiento y el porcentaje de inhibición del crecimiento de *P. citrophthora* en placa (Ensayo 2).

Table 2. Effect of treatments and applied doses on the growth radio and growth inhibition percentage of *P. citrophthora* on plate (Trial 2).

Tratamiento	Dosis	Radio 7	Radio 15	Inhibición 7	Inhibición 15
	$\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$	mm		%	
Control		62,2	79,0*		
Fertilizante	2	24,2	53,3	63,5	34,4 ^c
	3	6,7	18,0	90,3	78,6 ^b
	4	1,7	7,8	98,2	89,3 ^a
Azufre	1	57,5	79,0*	7,4	0*
	2	57,9	79,0*	7,2	0*
	3	59,0	79,0*	7,5	0*
Fungicida	2,5	0*	0*	100*	100*
ANOVA					
	<i>Tratamiento</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	<i>Bloque</i>	0,0118	0,0058	0,1430	0,0018
	<i>Tratamiento x Bloque</i>	0,0000	0,0002	0,0000	0,6965

Radio 7 y 15: radio de crecimiento a los 7 y 15 días desde la inoculación; Inhibición 7 y 15: porcentaje de inhibición del crecimiento a los 7 y 15 días desde la inoculación.

Los valores promedio seguidos de distinta letra superíndice en una misma columna indican diferencia estadísticamente significativa según el test de Tukey (HSD). $n = 6$.

* Los valores marcados con un asterisco no fueron incluidos en el test de comparación de medias. Se muestra el valor promedio de las repeticiones para ese tratamiento.

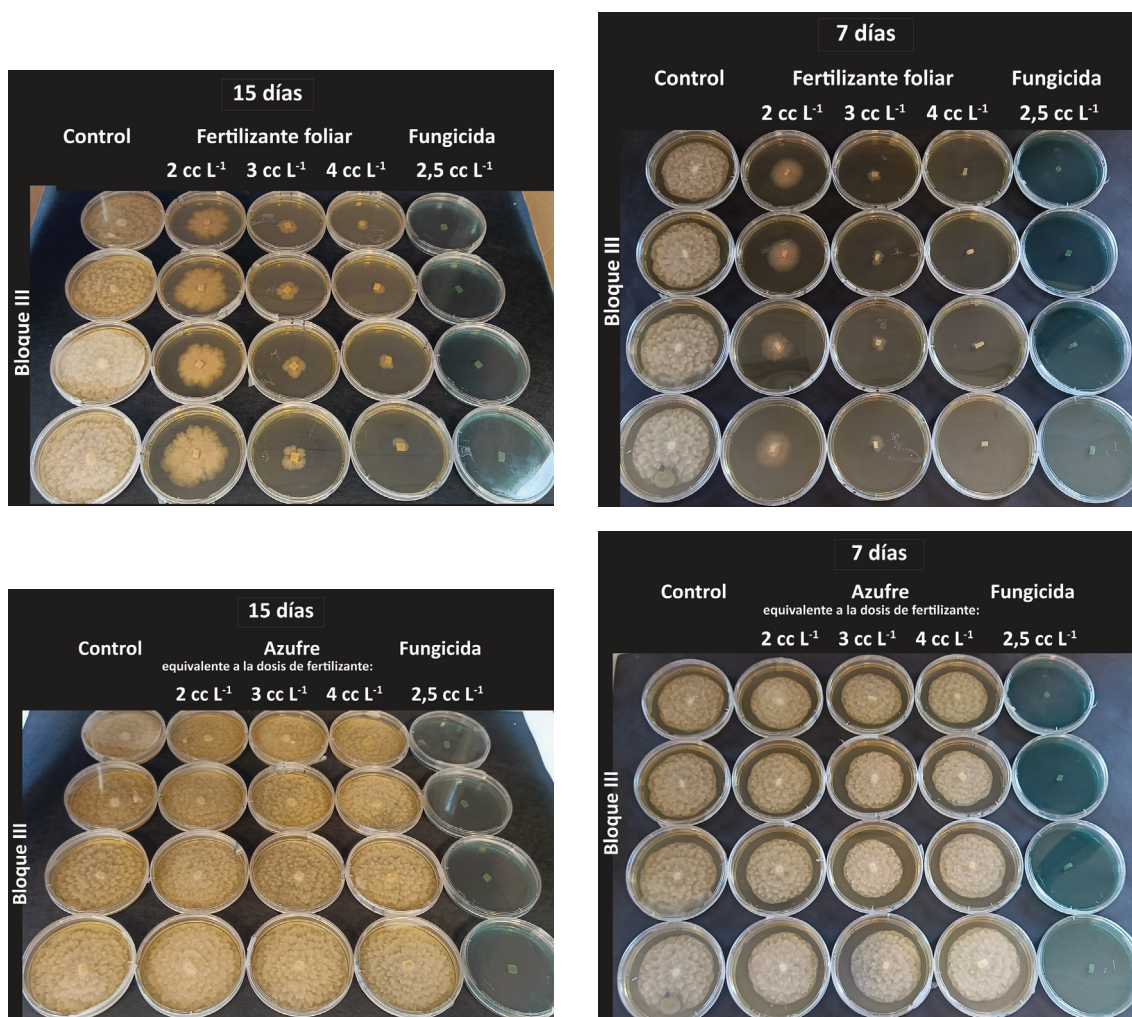


Figura 3. Detalle del crecimiento de *P. citrophthora* en placa, sobre PDA con los diferentes tratamientos, a los 7 (izquierda) y 15 (derecha) días tras la inoculación (Ensayo 2).

Figure 3. Detail of *P. citrophthora* growth on PDA plates under different treatments, at 7 (left) and 15 (right) days after inoculation (Trial 2).

Este porcentaje se incrementó conforme al aumento de la concentración de fertilizante, salvo en el bloque I, en el que no se observaron diferencias entre las dosis de 3 y 4 $\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$ (Figura 5). Esta diferencia entre bloques explica que la interacción entre factores fuese significativa (Tabla 2). El porcentaje de inhibición del crecimiento se redujo a lo largo del

ensayo, pero el efecto de la fertilización siguió siendo significativo a los 15 ddi (Tabla 2).

Para comprobar el efecto fungicida o fungistático del fertilizante, al igual que en el ensayo anterior, se tomaron los botones procedentes de las placas tratadas, en este caso del bloque II, y se colocaron sobre PDA sin tratar. Se observó crecimiento de micelio a

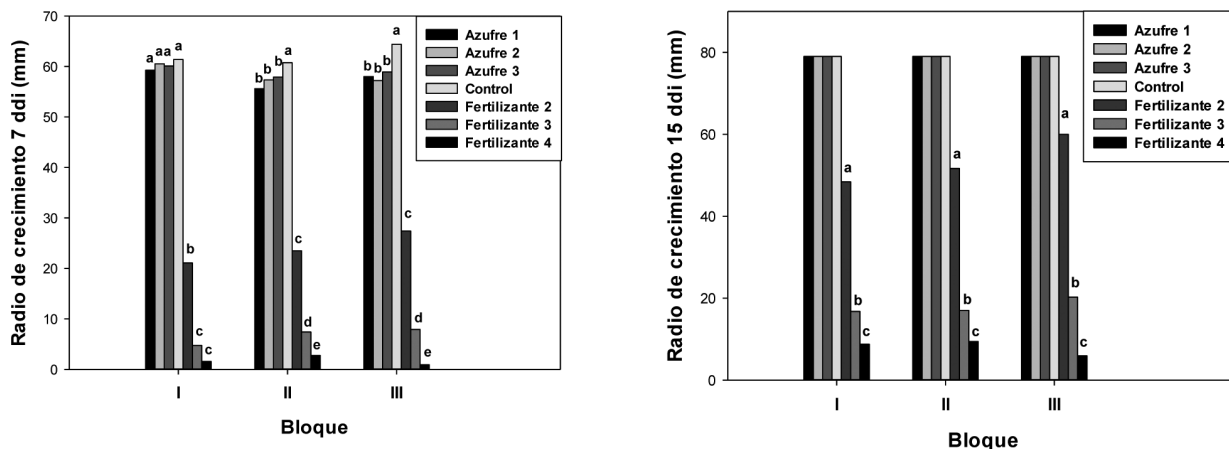


Figura 4. Efecto de los tratamientos sobre el radio de crecimiento del micelio a los 7 (izquierda) y 15 (derecha) días tras la inoculación (ddi) (Ensayo 2). Las barras de error representan el error estándar (n = 6).
 Figure 4. Effect of treatments on mycelial growth radius at 7 days (left) and 15 days (right) after inoculation (dai) (Trial 2). Error bars represent the standard error (n = 6).

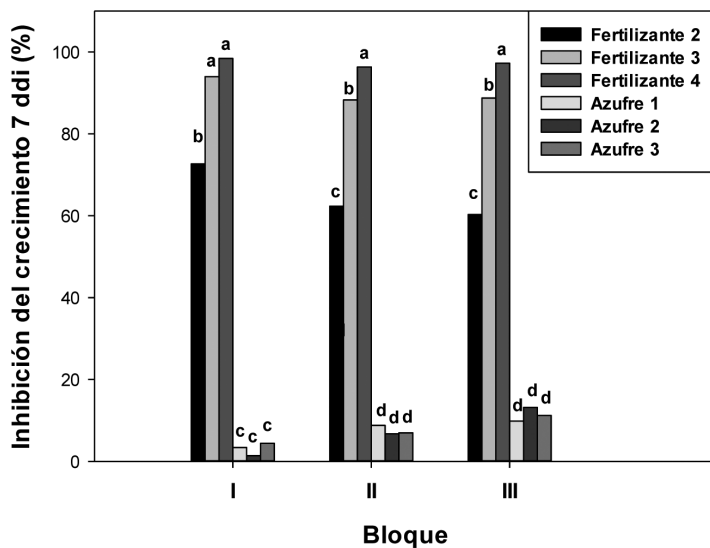


Figura 5. Efecto de los tratamientos sobre el porcentaje de inhibición del crecimiento a los 7 días tras la inoculación (ddi) (Ensayo 2). Las barras de error representan el error estándar (n = 6).
 Figure 5. Effect of treatments on the percentage of growth inhibition at 7 days after inoculation (dai) (Trial 2). Error bars represent the standard error (n = 6).

los 5 días en todas las placas procedentes del control positivo (4/4) y en ninguna de las que procedían del tratamiento con fungicida (0/4). También creció micelio en todas las

placas que provenían de la aplicación del fertilizante a $2 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ (4/4) y $3 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ (4/4), y en 3/4 placas procedentes de $4 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ (Figura 6).

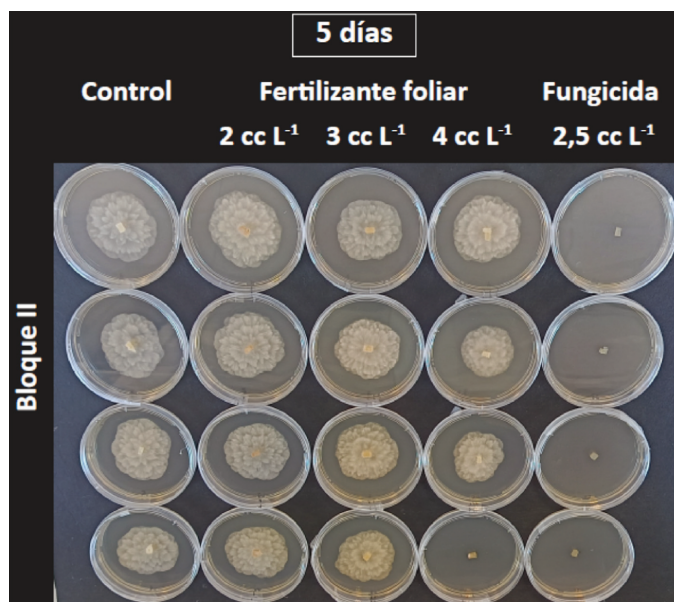


Figura 6. Detalle del crecimiento de *P. citrophthora* en placa sobre PDA sin tratar, 5 días tras la inoculación (Ensayo 2).

Figure 6. Detail of *P. citrophthora* growth on untreated PDA plate, 5 days after inoculation (Trial 2).

Discusión

El efecto de los fungicidas de contacto a base de cobre y/o azufre sobre el desarrollo de las enfermedades causadas por *Phytophthora* spp. se ha estudiado ampliamente, tanto para cultivos agrícolas como para especies forestales (Henderson, 1945; Rolando et al., 2019). Sin embargo, pocos trabajos abordan el efecto de la fertilización sobre este patógeno. Además, los resultados publicados parecen ser contradictorios. Por ejemplo, un estudio de Morales et al. (2019) relacionó la aplicación de concentraciones crecientes de nitrógeno con un menor crecimiento de micelio de *P. cinnamomi*,

pese a que la fertilización nitrogenada ha sido comúnmente asociada a una mayor severidad de las enfermedades causadas por *Phytophthora* spp. En cambio, Yandoc et al. (2007) observaron que la severidad de *P. nicotinae* tiende a aumentar conforme aumenta la concentración de sales de la solución nutritiva de riego, mientras que Endes (2024) observó que la severidad de *P. citrophthora* es mayor en condiciones deficitarias de hierro. Por tanto, hay una gran diversidad en la respuesta de este patógeno a las distintas fuentes de fertilización, referidas a la severidad de las enfermedades que causa.

Este trabajo trató de evaluar el efecto de dosis crecientes de un fertilizante foliar a base de cobre, zinc, y azufre sobre el crecimiento de *P. citrophthora* en condiciones controladas. En general, se observó un detrimento de su crecimiento, ya que el radio que ocupó el micelio fue significativamente menor en las placas tratadas con fertilizante respecto a las no tratadas (control positivo), tanto a los 7 como a los 15 ddi. Este resultado coincide con el obtenido en un estudio similar, en el que se observó una inhibición completa del crecimiento del micelio de *P. nicotianae* con la aplicación de fosfitos de cobre y zinc, a una concentración de 10 ppm (Lucero et al., 2014). En nuestro caso, las dosis ensayadas no mostraron un efecto de inhibición completa, pero sí se redujo de forma significativa el crecimiento del micelio conforme al aumento de la concentración de fertilizante en el medio de cultivo (Vincent et al., 2018) observándose, además, un claro deterioro de sus estructuras de crecimiento (Figura 7). Las hifas no se extendieron adecuadamente, por lo que presentaron un aspecto atrofiado. Esta alte-

ración del crecimiento dio lugar a malformaciones y, probablemente, a una reducción de la capacidad reproductiva del hongo. La actividad antimicrobiana del cobre se atribuye a los daños que provoca en la membrana celular y a la alteración de la homeostasis, que depende en gran medida de la expresión de los genes transportadores de cobre (Vincent et al., 2018). El efecto de control puede atribuirse tanto a la toxicidad del cobre para los microorganismos como al efecto del zinc en mejora de la nutrición y en la activación de los mecanismos de defensa de la planta (Elmer et al., 2018), a través de la regulación de las rutas de señalización asociadas a hormonas defensivas (Cabot et al., 2019) y de la mejora de la expresión de los genes de resistencia a la infección (Martos et al., 2016). Sin embargo, no puede afirmarse que el azufre tenga un papel relevante en el control de *P. citrophthora*, al menos a las dosis ensayadas, ya que solo se ha observado un ligero efecto de reducción de su crecimiento en placa durante los primeros 7 días tras la inoculación.

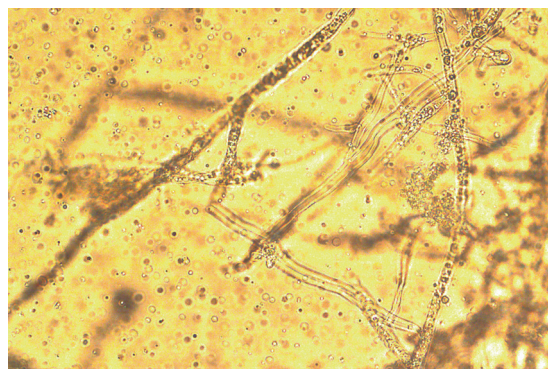
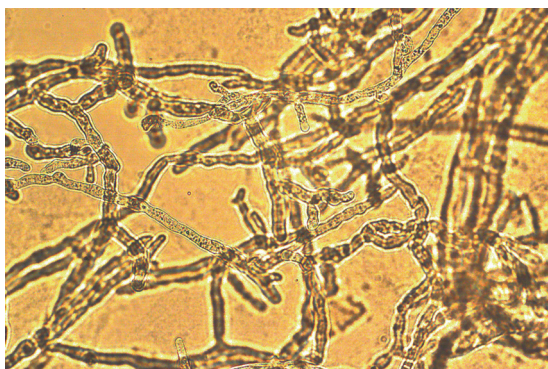


Figura 7. Detalle del estado del micelio y de la concentración de zoosporas de *P. citrophthora* procedente de una placa fertilizada con $2 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ (izquierda) y de una placa control positivo (derecha) (Ensayo 2). Las observaciones se realizaron empleando microscopía óptica de campo claro (x400).

Figure 7. Detail of mycelial condition and zoospore concentration of *P. citrophthora* from a plate treated with $2 \text{ cm}^3 \cdot \text{L}^{-1}$ (left) and from a positive control plate (right) (Trial 2). Observations were made using bright-field optical microscopy (400x).

Por otro lado, el porcentaje de inhibición del crecimiento superó el 80 % a los 7 ddi y el 70 % a los 15 ddi en el ensayo 1. Esto sugiere que el crecimiento de *P. citrophthora* puede inhibirse significativamente, durante al menos 15 días, a partir de una dosis de $2 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ ($53,2 \text{ mg L}^{-1}$ de Cu) del fertilizante estudiado, la cual podría equipararse a una dosis de $2,5 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de un fungicida comercial a base de oxiclورو de cobre ($565,3 \text{ mg L}^{-1}$ de Cu), cuyo efecto puede perdurar en torno a 3 meses (Rolando et al., 2019). Los resultados obtenidos en el ensayo 2 indicaron, además, que este porcentaje aumenta de forma significativa conforme al incremento de la dosis de fertilizante.

El micelio de los botones que estuvieron en contacto con el fungicida no creció al ser colocado sobre PDA sin tratar, mientras que aquellos que procedían de las placas fertilizadas y del control positivo crecieron en la mayoría de los casos, indicando que las distintas dosis de fertilizante inhibieron el crecimiento de *P. citrophthora*, pero no tuvieron un efecto fungicida. Este resultado puede atribuirse, en parte, al tiempo de exposición (Keast et al., 1985) y a la menor sensibilidad al cobre observada en el crecimiento del micelio en comparación a las esporas asexuales de algunas especies de *Phytophthora* spp. (Hooley y Shaw, 1985; Slade y Pegg, 1993). También se ha observado que el número de esporangios puede reducirse considerablemente con la aplicación de cobre y azufre (Halsall, 1977), lo que explicaría, además del daño observado en las estructuras de crecimiento, que la concentración de zoosporas en las placas fertilizadas con $2 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ se viese drásticamente reducida en comparación al control positivo (Figura 7).

Conclusiones

El presente estudio mostró que la aplicación de un fertilizante foliar a base de cobre, zinc y azufre puede inhibir significativamente el

crecimiento de *P. citrophthora*, constituyendo una estrategia complementaria en el manejo integrado de enfermedades causadas por este patógeno. No obstante, dado que la eficacia de las aplicaciones de cobre y zinc sobre el control de *Phytophthora* spp. puede variar considerablemente entre los ensayos *in vitro* e invernadero (AlHarethi et al., 2024), se requiere experimentación adicional para contrastar su eficacia en condiciones de campo. En ese sentido, además del efecto *per se* del producto, la mejora de la nutrición y la activación de los mecanismos de defensa de la planta podrían mejorar los resultados observados en este trabajo.

Declaración de contribución de autoría

- Aurora Moreno-Lora: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, validación, visualización y redacción (borrador original y revisión).
- Ana Aguado: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, software, supervisión, validación, visualización, redacción (revisión).
- Francisco J. Arenas-Arenas: Conceptualización, adquisición de fondos, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado bajo el convenio de colaboración entre la empresa IBERMEM BIOTECH S.A. y el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA).

Referencias bibliográficas

- AlHarethi A.A., Abdullah Q.Y., AlJobory H.J., Anam A.M., Arafa R.A., Farroh K.Y. (2024). Zinc oxide and copper oxide nanoparticles as a po-

- tential solution for controlling *Phytophthora infestans*, the late blight disease of potatoes. *Discover Nano* 19: 105. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04040-6>
- Cabot C., Martos S., Llugany M., Gallego B., Tolrà R., Poschenrieder C. (2019). A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivores. *Frontiers in Plant Science* 10: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01171>
- Duran-Vila N., Moreno P. (2000). Enfermedades de los cítricos. Monografía de Sociedad Española de Fitología 2. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 165 pp.
- Elmer W., Ma C., White J. (2018). Nanoparticles for plant disease management. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 6: 66-70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.08.002>
- Endes A. (2024). The effect of *Phytophthora citrophthora* infection of strawberry physiology and histology in the presence of calcium, iron, and zinc deficiencies. *Applied Fruit Science* 66: 1767-1775. <https://doi.org/10.1007/s10341-024-01160-2>
- Erwin D.C., Bartnicki-Garcia S., Tsao P.H. (1983). *Phytophthora*: its biology, taxonomy, ecology, and pathology. Ed. American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota. 392 pp.
- Erwin D.C., Ribeiro O.K. (1996). *Phytophthora* diseases worldwide. Ed. American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota. 592 pp.
- Graham J.H., Timmer L.W., Drouillard D.L., Peever T.L. (1998). Characterization of *Phytophthora* spp. causing outbreaks of citrus brown rot in Florida. *Phytopathology* 88: 724-729. <https://doi.org/10.1094/phyto.1998.88.7.724>
- Graham J.H., Menge J.A. (1999). Root diseases. En: *Citrus Health Management* (Eds. Timmer, L.W., Duncan, L.W.), pp. 126-135. American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota.
- Halsall D.M. (1977). Effects of certain cations on the formation and infectivity of *Phytophthora zoospores*. 2. Effects of copper, boron, cobalt, manganese, molybdenum, and zinc ions. *Canadian Journal of Microbiology* 23: 1002-1010. <https://doi.org/10.1139/m77-149>
- Henderson R.G. (1945). Further testing of copper fungicides for control of tomato blight in Southwest Virginia. *Phytopathology* 35: 120-128.
- Hooley P., Shaw D.S. (1985). Inheritance of sensitivity to heavy metals in *Phytophthora drechsleri*. *Transactions of the British Mycological Society* 85: 677-681. [https://doi.org/10.1016/S007-1536\(85\)80263-1](https://doi.org/10.1016/S007-1536(85)80263-1)
- Huang X., Sun M., Lu X., Li S. (2019). Serial passage through resistant and susceptible cucumber cultivars affects the virulence of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*. *MicrobiologyOpen* 8: e00641. <https://doi.org/10.1002/mbo3.641>
- Keast D., Tonkin C., Sanfelieu L. (1985). Effects of copper salts on growth and survival of *Phytophthora cinnamomi* *in vitro* and on the antifungal activity of actinomycete populations from the roots of *Eucalyptus marginata* and *Banksia grandis*. *Australian Journal of Botany* 33: 115-129. <https://doi.org/10.1071/bt9850115>
- Lin L., Xu C. (2020). Arcsine-based transformations for meta-analysis of proportions: Pros, cons, and alternatives. *Health Science Reports* 3: e178. <https://doi.org/10.1002/hsr2.178>
- Lucero G., Boiteux J., Pizzuolo P., Hapon M.V. (2014). Effect of Copper, Zinc and Potassium Phosphites on the Mycelium Growth of *Phytophthora nicotianae* in Olive Tree Dry Branch Disease. VII International Symposium on Olive Growing, 30 octubre, San Juan, Argentina, pp. 437-442. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1057.55>
- Martos S., Gallego B., Cabot C., Llugany M., Barceló J., Poschenrieder C. (2016). Zinc triggers signaling mechanisms and defense responses promoting resistance to *Alternaria brassicicola* in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 249: 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.05.001>
- Matheron M.E., Matejka J.C. (1993). Seasonal differences in susceptibility of three citrus rootstocks to root lesions caused by *Phytophthora citrophthora* and *P. parasitica*. *Plant Disease* 77: 729-732. <https://doi.org/10.1094/pd-77-0729>
- Morales J., Besoain X., Cuneo I.F., Larach A., Alvarado L., Cáceres-Mella A., Saa S. (2019). Impact of nitrogen fertilization on *Phytophthora cinnamomi* root-related damage in *Juglans regia*

- Saplings. HortScience 54: 2188-2194. <https://doi.org/10.21273/hortsci14299-19>
- Rolando C., Somchit C., Bader M.K.F., Fraser S., Williams N. (2019). Can copper be used to treat foliar *Phytophthora* infections in *Pinus radiata*?. Plant Disease 103: 1828-1834. <https://doi.org/10.1094/pdis-07-18-1247-RE>
- Sale C.E., Dooh J.P.N., Heu A., Tueguem W.K., Nganti D.M., Ngatsi P.Z., Chewachong G., Ambang Z. (2021). Efficacy of methanolic and aqueous extracts of *Thevetia peruviana* (pers.) K. Schum on growth of *Phytophthora colocasiae* Racib, causal agent of taro late blight in cameroon. Journal of Applied Life Sciences International 24: 44-54. <https://doi.org/10.9734/jalsi/2021/v24i430233>
- Slade S.J., Pegg G.F. (1993). The effect of silver and other metal ions on the *in vitro* growth of root-rotting *Phytophthora* and other fungal species. Annals of Applied Biology 122: 233-251. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1993.tb04030.x>
- Trehan S.P., Sharma K.K., Grewal J.S. (1995). Effect of soil and foliar application of micronutrients and fungicides on late blight (*Phytophthora-Infestans*) and tuber yield of potato (*Solanum-Tuberosum*). The Indian Journal of Agricultural Sciences 65: 836-841.
- Tuset, J.J. (1995). La incidencia de las especies de "Phytophthora" en los agríos. Phytoma 72: 159-161.
- Tuset J.J., Hinarejos C., García J. (1990). Phytophthora foot rot control in citrus with *Myrothecium roridum*. EPPO Bulletin 20: 169-176. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1990.tb01195.x>
- Vicent A., Tuset J.J. (2013). Enfermedades causadas por Phytophthora en cítricos. Descripción y bases para su gestión integrada. Levante Agrícola 419: 332-336.
- Vincent M., Duval R.E., Hartemann P., Engels-Deutsch M. (2018). Contact killing and antimicrobial properties of copper. Journal of Applied Microbiology 124: 1032-1046. <https://doi.org/10.1111/jam.13681>
- Yandoc C.B., Roskopf E.N., Shah D.A., Albano J.P. (2007). Effect of fertilization and biopesticides on the infection of *Catharanthus roseus* by *Phytophthora nicotianae*. Plant Disease 91: 1477-1483. <https://doi.org/10.1094/pdis-91-11-1477>

(Aceptado para publicación el 20 de octubre de 2025)

Segregación de la motilidad espermática en subpoblaciones como herramienta para mejorar el diagnóstico de la calidad seminal en verracos

Decio González-Villalobos¹ y Armando Quintero-Moreno^{1,2,*}

¹ Laboratorio de Andrología, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad del Zulia. Venezuela.

² Área de Producción Animal, Departamento de Ciencias Agroforestales, ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia, España.

Resumen

La incorporación de sistemas computarizados para la evaluación de la calidad seminal (CASA) ha hecho posible el establecimiento de métodos de evaluación de la motilidad espermática en forma objetiva, sin la necesidad del juicio discrecional del operador. Con la finalidad de evaluar la motilidad espermática mediante el CASA, agruparla en subpoblaciones espermáticas (Sp) y observar su variación por efecto del individuo y la refrigeración para optimizar y mejorar el CASA como herramienta diagnóstica, se llevó a cabo un estudio en una granja porcina en Venezuela. A partir de muestras diluidas se realizó el análisis, valorando los descriptores de motilidad en 30 eyaculados óptimos provenientes de 6 verracos. Los datos obtenidos fueron analizados mediante el procedimiento FASTCLUS, ajustado con GLM del SAS® para establecer las Sp. Se determinó la presencia de tres Sp (Sp1, Sp2, Sp3), siendo la Sp3 (36,44 %) la de mayor velocidad y movimiento progresivo; la Sp2 (24,17 %) con menor velocidad y movimientos oscilatorios; y la Sp1 (39,39 %) con el movimiento más lento, pero más progresivo que la Sp2. Para analizar la distribución de las Sp en función del verraco y del tiempo de refrigeración, se realizó un análisis de Chi-cuadrado (χ^2). Se encontraron diferencias porcentuales significativas entre las Sp según el verraco ($\chi^2 \leq 0,0001$), no obstante, todos tenían excelente motilidad. El proceso de refrigeración durante 72 h afectó la Sp con mayor velocidad y progresividad ($\chi^2 \leq 0,0001$). Se concluye que el estudio de las Sp mediante el CASA es un método altamente sensible, capaz de detectar diferencias en la motilidad que no son perceptibles para un operador calificado.

Palabras Clave: Espermatozoide, semen, sistema CASA, computador, porcino.

Segregation of sperm motility into subpopulations as a tool to improve the diagnosis of semen quality in boars

Abstract

The incorporation of computer-assisted semen analysis (CASA) systems has enabled the development of objective methods for assessing sperm motility, eliminating the need for subjective operator judgment. To evaluate sperm motility using CASA, classify it into sperm subpopulations (Sp), and assess variation due

* Autor para correspondencia: armando.quintero@uva.es

Cita del artículo: González-Villalobos D., Quintero-Moreno A. (2025). Segregación de la motilidad espermática en subpoblaciones como herramienta para mejorar el diagnóstico de la calidad seminal en verracos. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 121(4): 368-381. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.014>



Copyright: © 2025 de los autores. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0)

to individual differences and refrigeration, a study was conducted on a pig farm in Venezuela. Diluted samples from 30 optimal ejaculates collected from six boars were analyzed for motility descriptors. The data were processed using the FASTCLUS procedure, adjusted with the GLM procedure in SAS® to identify the Sp. Three distinct Sp were identified: Sp3 (36.44 %) exhibited the highest velocity and progressive movement; Sp2 (24.17 %) showed the lowest velocity and oscillatory movement; and Sp1 (39.39 %) had the slowest movement but was more progressive than Sp2. To evaluate the distribution of Sp across individuals and storage times, a Chi-square (χ^2) analysis was performed. Significant differences in sub-population percentages were found among boars ($\chi^2 \leq 0.0001$), although all showed excellent motility. The 72-hour refrigeration process significantly affected the Sp with the highest velocity and progressiveness ($\chi^2 \leq 0.0001$). These results suggest that CASA-based analysis of Sp is a highly sensitive method capable of detecting differences that are not apparent to even experienced operators.

Keywords: Sperm, semen, CASA system, computer, swine.

Introducción

El espermatozoide es una célula altamente especializada y compleja, dotada de movilidad como resultado de un sofisticado proceso evolutivo. Sus características principales han demostrado ser tan eficaces que se conservan de manera uniforme en numerosos organismos, tanto vertebrados como invertebrados (Fawcett, 1970; Phillips, 1970). La estructura encargada de generar el movimiento es el flagelo, en cuyo interior se integran mecanismos moleculares capaces de producir la energía necesaria para sostener la motilidad espermática, logrando un equilibrio preciso entre la contracción activa y la fuerza generada por la flexión elástica (Lindemann *et al.*, 1992). La capacidad de movimiento del espermatozoide se considera esencial para el proceso de fecundación in vivo. Por ello, desde hace tiempo se ha asumido que la evaluación de la motilidad en una muestra de semen está relacionada con la fertilidad y prolificidad potencial de un eyaculado o de un semental en un momento determinado (Dott y Foster, 1979). Sin embargo, numerosos estudios que han intentado establecer esta relación han fracasado en demostrar una asociación sólida entre motilidad y fertilidad, probablemente debido a la baja precisión y elevada variabilidad de las observaciones, consecuencia de

la subjetividad inherente a los métodos tradicionales de evaluación de la motilidad (Amann, 1989; Gadea *et al.*, 2004; Foxcroft *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista conceptual, la cinética se refiere al estudio de la velocidad en que ocurren los procesos prescindiendo de las fuerzas que lo originan (RAE, 2001). Siendo el movimiento espermático un evento susceptible de realizar mediciones objetivas de velocidad, el método clásico, basado en asignar por observación directa un valor subjetivo dentro de una escala establecida por rasgos cualitativos del movimiento de la población espermática, obviamente imposibilita determinar las variables cinéticas del movimiento espermático, y por tanto hallar diferencias objetivas que pudieran finalmente establecer conexiones significativas entre la motilidad y el potencial fecundante de los espermatozoides. El desarrollo y la aplicación de técnicas de digitalización e interpretación de imágenes por computador en el campo de la biología, ha hecho posible el establecimiento de métodos de evaluación de la motilidad espermática que proveen información de células individuales sin la necesidad del juicio discrecional del operador (Gravance y Davis, 1995). El fundamento común de estos métodos, denominados convencionalmente *Computer-Assisted Sperm Analysis*

(CASA), es el de ingresar en un computador las imágenes en secuencia de cada célula en movimiento captadas mediante una cámara acoplada a un microscopio de contraste de fases, determinando mediante un software la velocidad de cada espermatozoide, el porcentaje de espermatozoides móviles en una muestra y la asignación en grupos según el tipo de movimiento. Estos métodos más rápidos, precisos, menos susceptibles de error han abierto el campo de estudio de la cinética espermática cuyo potencial se está consolidando desde hace tiempo (Amann y Waberski, 2014).

Una de las principales ventajas del sistema CASA es su capacidad para generar datos cinéticos a partir de cientos o incluso miles de espermatozoides individuales por cada muestra analizada. Esta propiedad ha potenciado aún más su valor como herramienta analítica, al permitir la integración de dichos datos con procedimientos estadísticos multivariados de agrupamiento o análisis de clústeres, lo cual ha contribuido significativamente a una caracterización más precisa de la heterogeneidad espermática (Abaigar *et al.*, 1999; Quintero-Moreno *et al.*, 2004; Ramio *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2009; Martínez-Pastor *et al.*, 2011; Ibanescu *et al.*, 2018; Henning *et al.*, 2022). El análisis de *clústeres* es un procedimiento que ordena la data en grupos, de manera que todas las observaciones dentro de cada grupo son similares según los criterios sugeridos por el programa estadístico de elección. Este análisis ha permitido determinar que la población de espermatozoides en un eyaculado no es homogénea, sino que está compuesta por distintas subpoblaciones espermáticas (Sp), cada una con características específicas (Quintero-Moreno *et al.*, 2004). Esta información resalta la motilidad como un marcador objetivo de la calidad seminal, ya sea para detectar diferencias entre verracos, predecir su resistencia al procesamiento y almacenamiento en frío, o estimar

su potencial fecundante, dado que el eyaculado no se considera una población homogénea en términos de motilidad (Quintero-Moreno *et al.*, 2004; Sancho y Vilagran, 2013; Amann y Waberski, 2014). En cerdos, al igual que en otros mamíferos, se ha reportado la existencia de subpoblaciones espermáticas (Sp) diferenciadas con base en su perfil de motilidad. Sin embargo, la comunidad científica que trabaja con sistemas CASA aún no ha alcanzado un consenso respecto al método estadístico más adecuado para su identificación, por lo que resulta necesario establecer criterios comunes para este propósito (Fernández-López *et al.*, 2022).

El presente estudio tiene la finalidad de valorar la cinética espermática mediante el sistema computarizado CASA como método para mejorar la precisión de la evaluación seminal en verracos en ambiente tropical, para lo cual se establecieron Sp en función de los descriptores de motilidad, discriminados por verraco y por el tiempo de almacenamiento bajo refrigeración a 16 °C desde las 24 h hasta las 72 h.

Material y métodos

Ubicación y manejo de los animales

El estudio se realizó en la granja comercial PROPORCA, ubicada en el municipio San Francisco, estado Zulia, Venezuela (coordenadas 10° 30' 45" N, 71° 45' 42" O), dentro de una zona agroecológica clasificada como bosque seco tropical. Se utilizaron 30 eyaculados provenientes de seis verracos de la raza Pietrain, con edades entre 16 y 20 meses, destinados a la producción de semen para inseminación artificial (IA) con semen refrigerado. La recolección se llevó a cabo siguiendo una rutina establecida, con extracciones cada 5 a 7 días, hasta completar cinco evaluaciones por cada verraco. La obtención y el procesa-

miento de las muestras seminales se realizaron conforme al protocolo de extracción y preparación de dosis para IA implementado en la granja (Morales *et al.*, 2012). Para la extracción del semen, se induce al verraco a montar un maniquí y se recolecta el eyaculado mediante manipulación manual, técnica conocida como "mano enguantada" (King y Macpherson, 1973). Durante el proceso, se descarta la primera fracción del eyaculado y se filtra la fracción gelatinosa.

Los verracos se mantienen en un ambiente controlado que garantiza condiciones óptimas de temperatura y humedad relativa (Calatayud-Márquez y Quintero-Moreno, 2021), y reciben una dieta basada en alimento concentrado comercial formulado específicamente para su categoría (Morales *et al.*, 2012).

Procesamiento del semen

La obtención y el procesamiento del semen fueron realizados por un operador con experiencia comprobada. Una vez extraído el eyaculado, se evaluaron los parámetros mínimos requeridos para su uso en inseminación artificial (IA). Se observaron el color, el olor y el aspecto general de la muestra. Posteriormente, se midió el volumen y se evaluó la motilidad mediante la observación directa de una gota de semen fresco colocada sobre un portaobjetos previamente calentado a 37 °C, utilizando un microscopio óptico con aumento de 400x. La motilidad se calificó según la calidad del movimiento espermático descrita por Martín-Rillo *et al.* (1996), mediante una escala de 0 a 5, donde 0 indica ausencia total de movimiento y 5 representa un movimiento óptimo, equivalente al 100 % de motilidad. La concentración espermática se determinó utilizando una cámara de Neubauer®, y el número total de espermatozoides por eyaculado se calculó multiplicando la concentración por el volumen del eyaculado.

En esta granja, los requisitos mínimos establecidos para la utilización de los eyaculados en la elaboración de dosis para inseminación artificial son: una motilidad igual o superior a 3,5 (equivalente al 70 %), ausencia de aglutinación o niveles $\leq 10\%$, y un número total de espermatozoides por eyaculado igual o superior a 32×10^9 . Los eyaculados que cumplen con estos criterios son diluidos utilizando el diluyente comercial MR-A® (Kubus, Majadahonda, España). Posteriormente, tras un período de estabilización de 2 h en oscuridad, las dosis de inseminación se envasan en frascos plásticos desechables de 100 mL, con una concentración de 4×10^9 espermatozoides por botella, y se almacenan a 16 °C por un período máximo de cinco días.

Preparación de la muestra para análisis de la viabilidad espermática

Se pipetearon 20 μL de semen puro recién recolectado y 100 μL de diluyente en un tubo Eppendorf, mezclándose suavemente. A continuación, se colocó una gota de la mezcla en un portaobjetos para su evaluación microscópica. A un aumento de 100X, se valoró la motilidad individual, y con base en estos resultados se determinó si el eyaculado sería procesado.

El experimento se inició utilizando semen previamente procesado y refrigerado a 16 °C, realizándose evaluaciones a las 24 y 72 h posteriores al procesamiento para determinar la motilidad, vitalidad y presencia de anomalías espermáticas. Para la preparación de los extendidos, se utilizaron portaobjetos precalentados a 37 °C mediante una platina térmica. Se mezclaron 10 μL de semen diluido con 10 μL de la tinción eosina-nigrosina, homogenizando la muestra cuidadosamente antes de realizar el extendido. Posteriormente, la preparación se dejó secar al ambiente y fue almacenada para su observación bajo un microscopio óptico con un aumento de 400x.

Determinación de vitalidad, anomalías morfológicas y alteración del acrosoma

Una vez realizada la dilución del semen, se procedió a determinar la vitalidad espermática y las anomalías morfológicas (AM). Para ello, se analizaron al menos 200 espermatozoides por muestra, registrando el porcentaje de células vivas (no teñidas) y muertas (teñidas). Las AM se clasificaron como normales o anormales, incluyendo defectos en la cabeza (número, tamaño y forma), en la pieza intermedia (posición y apariencia) y en el flagelo (número, forma y tamaño), así como la presencia de gotas citoplasmáticas proximales y distales. Adicionalmente, se evaluó el porcentaje de espermatozoides con alteraciones acrosómicas mediante observación a un aumento de 1000x (Bamba, 1988). Todas las muestras analizadas presentaron resultados óptimos en cuanto a vitalidad, morfología y normalidad acrosómica, cumpliendo con los estándares establecidos para la especie porcina (Rozeboom, 2003). Esta evaluación confirmó que las dosis seleccionadas para el análisis de los descriptores de motilidad eran óptimas.

Determinación de la motilidad mediante CASA

Después del procesamiento y envasado, se tomaron dos dosis seminales por cada verraco, las cuales fueron transportadas bajo refrigeración a 18 °C hasta el Laboratorio de Andrología de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia, donde se almacenaron a una temperatura constante de 16 °C. A las 24 h posteriores al envasado, se inició el análisis de las variables cinéticas mediante el sistema CASA. Cabe destacar que cada dosis seminal fue preparada para contener 2×10^9 espermatozoides. Sin embargo, se trasladó adicionalmente una botella con diluyente para realizar ajustes en caso de que la concentración observada al microscopio excediera los 100×10^6 espermatozoides/mL.

El estudio se estructuró en dos momentos. El primer análisis se realizó a las 24 h de almacenamiento a 16 °C. El segundo se llevó a cabo a las 72 h, con el objetivo de evaluar el efecto de la refrigeración prolongada, manteniendo las muestras durante todo ese período a la misma temperatura de 16 °C.

En ambos momentos de evaluación, se tomó una botella de cada eyaculado, la cual fue homogeneizada y posteriormente calentada en baño de maría a 37 °C durante 5 min. A continuación, se pipetearon 5 µL de semen, que fueron depositados en cámaras Leja® de 20 µm de profundidad y capacidad para 3 µL (Nieuw Vennep, Holanda), para su observación y captura digital mediante un microscopio triocular (Olympus BX41TF, Tokio, Japón), equipado con objetivo de 10x, contraste de fases negativo y platina calefactada.

El sistema de captura de imágenes consistió en una cámara de video (Basler® A312f, Ahrensburg, Alemania) conectada a un computador con un digitalizador de imágenes de video PIP-1024 B (Matrox Electronic System Ltd.®, Québec, Canadá). El software utilizado para el análisis fue el Sperm-Class Analyzer, SCA® v.3.4 (2008, Microptic, Barcelona, España). Este sistema CASA analiza 25 imágenes por campo visual, tomadas y digitalizadas en un intervalo total de 0,64 s, con una frecuencia de captura de 40 ms/imagen. A partir de esta secuencia, el software rastrea la trayectoria de cada espermatozoide presente en el campo (incluidos los inmóviles) y calcula objetivamente los parámetros cinéticos individuales: velocidad curvilínea (VCL, µm/s), velocidad rectilínea (VSL, µm/s), velocidad promedio (VAP, µm/s), índice de linealidad (LIN, %), índice de rectitud (STR, %), índice de oscilación (WOB, %) y desplazamiento lateral de la cabeza (ALH, µm).

Para cada muestra evaluada se analizaron, como mínimo, cinco campos visuales, registrando al menos 1.000 espermatozoides con sus respectivas trayectorias de movimiento.

La base de datos generada por el sistema CASA fue exportada a una hoja de cálculo de Excel®, conteniendo los descriptores individuales de motilidad espermática. A partir de estos datos, se excluyeron los espermatozoides que presentaban una VCL $\geq 400 \mu\text{m/s}$, así como aquellos con una VAP $\leq 10 \mu\text{m/s}$. Este último grupo fue clasificado Sp de espermatozoides inmóviles. Posteriormente, se realizó un ajuste porcentual de esta Sp con respecto al total de espermatozoides móviles, sobre los cuales se efectuó la posterior clasificación en Sp.

Análisis estadístico

Todos los datos obtenidos fueron analizados utilizando el software Statistical Analysis System® v8.2 para MS Windows® (SAS, 2004). Para identificar la presencia de Sp en el eyaculado, los descriptores de motilidad se sometieron a un análisis multivariado de agrupamiento no jerárquico (FASTCLUS). Posteriormente, se verificaron y ajustaron los resultados aplicando el Modelo Lineal General del Análisis de la Varianza (GLM) y se cuantificaron mediante el procedimiento LSMEANS.

Este procedimiento FASTCLUS ofrece una implementación eficiente del algoritmo *k-means*, diseñado para manejar grandes conjuntos de datos de variables cuantitativas, agrupando las observaciones de manera efectiva. Al aplicarse a poblaciones espermáticas, proporciona varias ventajas, ya que combina un método eficaz para identificar clústeres iniciales con un algoritmo iterativo estándar que minimiza la suma de distancias al cuadrado respecto a las medias de los clústeres. Esto permite una asignación rápida y eficiente de las observaciones a los clústeres más cercanos, lo que resulta particularmente útil cuando se trabaja con grandes volúmenes de datos, como en los estudios de poblaciones espermáticas analizadas mediante el sistema CASA (Quintero-Moreno et

al., 2004). Tras dividir los datos en varios grupos, se determinó que el número óptimo de Sp correspondía a tres. Para validar esta agrupación, se aplicó el coeficiente de determinación (R^2) a distintos números de clústeres, dado que un valor más alto de R^2 indica una mejor separación entre grupos. Sin embargo, cuando la adición de más clústeres deja de mejorar significativamente el R^2 (incremento $<5\%$), se considera que se ha alcanzado un número óptimo de grupos.

Además, al graficar la varianza explicada en función de k , se identificó el punto en el que la mejora de R^2 comienza a estabilizarse, formando un "codo" en la gráfica. Este punto sugiere el número ideal de Sp. Adicionalmente, se empleó el coeficiente de silueta como medida complementaria para evaluar la calidad del agrupamiento obtenido con el algoritmo de clasificación (Saputra et al., 2020).

Para determinar la distribución porcentual de las Sp entre verracos (1-6) y entre los tiempos de valoración (24 h vs. 72 h) se utilizó la prueba de *Chi-cuadrado* (χ^2).

Resultados y discusión

Convencionalmente, se ha asumido que, aunque una baja concentración espermática o un alto número de anomalías pueden correlacionarse con infertilidad, la alteración en la motilidad espermática tiene un impacto aún mayor cuando está presente (Turner, 2003). En este contexto, el sistema CASA permite un análisis altamente sofisticado de las características cinéticas de los espermatozoides. Este sistema ha evidenciado que la capacidad de movimiento dentro de un eyaculado es notablemente heterogénea, debido a factores como la espermatogénesis, las condiciones de ensamblaje, el grado de maduración y el tiempo de tránsito en el epidídimo (Harrison, 1996; Quintero-Moreno et al., 2004).

Los espermatozoides utilizados en este estudio provinieron de dosis seminales comerciales, ajustadas desde una concentración convencional de 4×10^9 a un rango de 1 a 3×10^9 espermatozoides, almacenadas entre 15 y 18 °C. Para activar su motilidad, las muestras se preincubaron a 37 °C. Las valoraciones se realizaron en muestras de $3 \mu\text{L}$, con una concentración máxima de 100×10^6 espermatozoides/mL, y un rango habitual de 30 a 60×10^6 , lo que permitió evaluar con precisión las trayectorias espermáticas. Se ha establecido que el intervalo óptimo de concentración para este tipo de análisis oscila entre 2 y 50×10^6 espermatozoides/mL (Yeste *et al.*, 2018). Según estos autores, concentraciones elevadas pueden aumentar el margen de error en la estimación de patrones individuales de motilidad, mientras que diluciones excesivas pueden reducir la calidad del movimiento espermático.

La tabla 1 muestra las variables cinéticas obtenidas tras aplicar el análisis multivariado FASTCLUS a 55.506 espermatozoides móviles provenientes de eyaculados de seis verracos, almacenados a 16 °C. Este análisis determinó que la forma más eficiente de subdividir la muestra fue mediante tres Sp, basándose en las variables con mayor capacidad explicativa de la variabilidad entre clústeres. Estas variables no solo caracterizan a cada Sp, sino que también permiten diferenciarlas entre sí.

En el presente estudio, las Sp se caracterizaron de la siguiente manera: Sp3 presentó los valores más altos de VSL, LIN y STR, indicando un movimiento rápido y progresivo. Sp2 mostró valores más altos de VCL y ALH, pero inferiores en VSL, LIN y STR respecto a Sp3, lo que sugiere una motilidad activa, pero con menor progresividad, posiblemente incluyendo espermatozoides hiperactivados. Sp1 agrupó a los espermatozoides más lentos, aunque con mayor progresividad que los de Sp2, probablemente correspondiendo a células en etapas de activación o cercanas al fin de su vida funcional.

Tabla 1. Media y desviación estándar de las variables cinéticas divididas en subpoblaciones espermáticas tras 24 h de refrigeración.
Table 1. Mean and standard deviation of kinetic variables divided into sperm subpopulations.

Subpoblación espermática	VCL	VSL	VAP	LIN	STR	WOB	ALH	BCF
Sp1	$42,5 \pm 16,5^c$	$15,42 \pm 8,0^c$	$26,5 \pm 10,8^c$	$38,2 \pm 18,2^b$	$58,2 \pm 20,0^b$	$64,4 \pm 16,0^b$	$2,18 \pm 0,8^b$	$5,01 \pm 2,8^c$
Sp2	$102,6 \pm 22,8^a$	$30,4 \pm 13,4^b$	$61,5 \pm 17,3^b$	$29,8 \pm 11,4^c$	$50,5 \pm 19,1^c$	$61,0 \pm 15,4^b$	$4,46 \pm 1,3^a$	$6,47 \pm 2,8^b$
Sp3	$76,9 \pm 22,7^b$	$55,6 \pm 16,3^a$	$63,7 \pm 16,9^a$	$73,8 \pm 13,5^a$	$87,4 \pm 9,6^a$	$84,3 \pm 11,0^a$	$2,58 \pm 1,1^b$	$7,64 \pm 2,7^a$

^{a,b,c} = valores con diferente superíndice indican diferencias significativas ($P \leq 0,001$); VCL = velocidad curvilínea ($\mu\text{m/s}$); VSL = velocidad rectilínea ($\mu\text{m/s}$); VAP = velocidad promedio ($\mu\text{m/s}$); LIN = índice de linealidad (%); STR = índice de rectitud (%); WOB = índice de oscilación (%); ALH = desplazamiento lateral de la cabeza (μm); BCF = frecuencia de batido cruzado (Hz).

Este enfoque multivariado ha sido aplicado con éxito en la especie porcina (Abaigar *et al.*, 1999; Quintero-Moreno *et al.*, 2004; Rivera *et al.*, 2005; Ramio *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2009; Ibanescu *et al.*, 2018; Henning *et al.*, 2022). En estos estudios, el número de clústeres se establece a priori y el investigador selecciona la cantidad de Sp que mejor explique el comportamiento de los datos. En el presente experimento, la clasificación osciló entre dos y cinco Sp, optándose por tres con base en el análisis del coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de silueta y el método del codo (Saputra *et al.*, 2020), los cuales confirmaron esta elección.

Generalmente, la clasificación de los espermatozoides se fundamenta en parámetros como VSL, VAP, y su grado de progresividad, evaluado mediante LIN y WOB (Davis *et al.*, 1995; Martínez-Pastor *et al.*, 2011). Sin embargo, el agrupamiento de los descriptores de motilidad sigue siendo un tema debatido y en evolución (Ibanescu *et al.*, 2018). En particular, se ha cuestionado el uso del método K-means (Martínez-Pastor, 2022). Aun así, diversos estudios recientes realizados por expertos en análisis estadístico y segmentación han respaldado su validez (Saputra *et al.*, 2020; Rodríguez-Monteaquedo *et al.*, 2024).

Desde hace tiempo, se ha criticado la interpretación de la motilidad como un valor unitario derivado del promedio poblacional (Quintero-Moreno *et al.*, 2004; Ibanescu *et al.*, 2018). Esto ha motivado el desarrollo de análisis más detallados a partir de los datos generados por CASA, permitiendo la clasificación en Sp. No obstante, la estandarización de estos criterios sigue siendo un reto, debido a la diversidad de sistemas CASA, cámaras, volúmenes analizados, tasas de captura y número de fotogramas por segundo (fps), así como a la cantidad de descriptores de motilidad evaluados simultáneamente (Martínez-Pastor, 2022).

Respecto a los fps, estudios en cerdos (Valverde *et al.*, 2018; Barquero *et al.*, 2021; Hackerova *et al.*, 2025) y otras especies (Castellini *et al.*, 2011; Bompart *et al.*, 2019) han demostrado que una mayor tasa de captura mejora la precisión en la medición de trayectorias espermáticas. En este experimento, el sistema CASA operó a 25 fps. Aunque esta tasa es relativamente baja, no comprometió los resultados, ya que, según Castellini *et al.* (2011), la motilidad general no se ve significativamente afectada por esta variable. Sin embargo, se ha reportado que la fps óptima para estudios en verracos oscila entre 200 y 225 (Valverde *et al.*, 2018), especialmente para estimar con mayor exactitud variables como VCL y BCF, mientras que el parámetro VSL no se afecta y los descriptores VAP, LIN, STR y WOB corresponden a parámetros que derivan de la relación VCL/VSL, por lo cual su variación va a depender de la variación de la VCL.

La selección de tres Sp fue además respaldada por trabajos previos como el de Quintero *et al.* (2004), que mostraron que la Sp más veloz no necesariamente es la más fecundante. En cambio, resaltaron la importancia de la Sp dominante con mayor progresividad y velocidad promedio (89,4 %), así como una Sp minoritaria (1,4 %) posiblemente hiperactivada. Por su parte, Abaigar *et al.* (1999), utilizando una metodología estadística distinta, también identificaron tres Sp: una rápida y progresiva (73,38 %), otra muy lenta (7,23 %) y una tercera con movimientos oscilatorios de baja progresividad (19,39 %). Hirai *et al.* (2001) encontraron una asociación entre mayor linealidad y fertilidad, aunque la prolificidad se relacionó con el porcentaje total de células móviles.

En estudios de semen refrigerado y/o criopreservado (Rivera *et al.*, 2005; Ramio *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2009), se identificaron cuatro Sp usando metodologías similares. Ibanescu *et al.* (2018) también identificaron

cuatro patrones de movimiento: rápidos y lineales, rápidos y no lineales, lentos y lineales, y lentos y no lineales, patrones que se han mantenido consistentes a pesar de las diferencias metodológicas.

Es importante destacar que en este estudio la clasificación se aplicó exclusivamente a espermatozoides móviles con $VAP \geq 10 \mu\text{m/s}$. Por lo tanto, existe una cuarta Sp correspondiente a células inmóviles que fue referenciada pero no incluida en los análisis estadísticos.

La variabilidad en los parámetros cinéticos, según el origen de la muestra, puede influir en la estructura del número de Sp, ya sea por especie, tipo de muestra (fresca, refrigerada o congelada), edad, entre otros factores. Se presume que la fertilidad de un eyaculado está influenciada por la abundancia de la Sp con mejores características fisiológicas. Por el contrario, un aumento en la proporción de Sp con indicadores de daño celular comprometería el potencial reproductivo del seminal (Amann y Waberski, 2014).

Para complementar el análisis, se evaluó la distribución porcentual de las Sp por animal (tabla 2). Tres verracos mostraron una clara predominancia de la Sp3, correspondiente a la subpoblación con mayor velocidad progresiva. Asimismo, la motilidad total observada visualmente (4-4,5 %) fue óptima (>3,5; 70 %) y similar entre individuos. Sin embargo, el análisis estadístico reveló diferencias porcentuales en las Sp entre eyaculados con apariencia de calidad semejante, lo que subraya la sensibilidad del sistema CASA frente a la observación subjetiva del operador.

El desafío actual radica en traducir estas diferencias en índices o marcadores predictivos del potencial reproductivo. En este sentido, Ferraz (2013) reportó que una mayor proporción de espermatozoides con alta veloci-

dad y progresividad se correlaciona con mayor éxito en pruebas de fecundación in vitro, posicionando el estudio de las Sp como herramienta clave en la selección de sementales de alto valor genético.

Es probable que los cambios en las proporciones de Sp dentro de un eyaculado estén influenciados por su procesamiento o almacenamiento (Quintero-Moreno *et al.*, 2004). En la tabla 3 se muestra el efecto del almacenamiento a 16 °C durante 72 h. Se observó una reducción porcentual y significativa de la Sp3 en un 13,74 %, mientras que la Sp2 y Sp1 aumentaron en 7,68 % y 3,06 %, respectivamente.

Dado que la Sp3 corresponde a la subpoblación de movimiento más rápido y progresivo, es razonable suponer que la refrigeración afectó negativamente la calidad cinética del eyaculado. Además, la respuesta del semen refrigerado puede variar según la estación del año y el clima (Ibanescu *et al.*, 2018; Calatayud-Márquez y Quintero-Moreno, 2021). Con base en estos hallazgos, se concluye que el almacenamiento durante 72 h afecta de manera significativa a la Sp con mayor progresividad. Esta alteración pudo ser cuantificada objetivamente gracias a la combinación del sistema CASA y el análisis multivariado de clústeres.

Finalmente, el análisis de Sp basado en datos obtenidos por CASA representa una renovación en la evaluación de la motilidad espermática. A diferencia de la evaluación subjetiva, esta metodología permite detectar variaciones con significancia estadística y relacionarlas con la calidad del semen, su capacidad de conservación y su potencial fecundante. Aunque aún no se dispone de un índice práctico que vincule directamente estos parámetros con la fertilidad, este estudio aporta un nuevo avance hacia ese objetivo.

Tabla 2. Cantidad y distribución porcentual de espermatozoides dentro de las subpoblaciones espermáticas discriminadas por verraco.
 Table 2. Quantity and percentage distribution of spermatozoa within sperm subpopulations discriminated by boar.

Subpoblación espermática	TOTAL	Agrupamiento de los espermatozoides en Sp de 6 verracos utilizados					
		1	2	3	4	5	6
Sp1	21.863 (39,39 %)	3.627 (39,91 %)	4.003 (46,41 %)	3.577 (37,28 %)	2.887 (29,74 %)	3.759 (31,93 %)	4.010 (37,84 %)
Sp2	13.415 (24,17 %)	2.839 (31,24 %)	2.080 (24,11 %)	1.992 (20,76 %)	1.799 (18,53 %)	2.596 (22,05 %)	2.109 (19,90 %)
Sp3	20.228 (36,44 %)	1.994 (21,94 %)	1.620 (18,78 %)	3.337 (34,78 %)	4.514 (46,49 %)	4.915 (41,75 %)	3.848 (36,31 %)
Spmóviles	55.506 (93,46 %)	8.460 (93,09 %)	7.703 (89,30 %)	8.906 (92,81 %)	9.200 (94,76 %)	11.270 (95,73 %)	9.967 (94,05 %)
Spinmóviles	3.883 (6,54 %)	628 (6,91 %)	923 (10,70 %)	689 (7,18 %)	509 (5,24 %)	503 (4,27 %)	631 (5,95 %)
Sp _{móviles+inmóviles} (100 %)	59.389	9.088	8.626	9.595	9.709	11.773	10.598
MT	4,16	4,0	4,0	4,5	4,5	4,0	4,0

MT: motilidad total obtenida por un operador cualificado (0-5). Prueba de $Chi^2 \leq 0,0001$ (Sp x verraco).

Tabla 3. Distribución porcentual de las subpoblaciones espermáticas en función del tiempo de refrigeración (24 h y 72 h) a 16 °C.

Table 3. Percentage distribution of sperm subpopulations as a function of cooling time (24 h and 72 h) at 16 °C.

Subpoblaciones espermáticas	Tiempo de refrigeración		Diferencia
	24 h	72 h	
Sp1	39,52 %	42,58 %	+3,06
Sp2	20,53 %	28,21 %	+7,68
Sp3	42,95 %	29,21 %	-13,74

Sp = subpoblaciones espermáticas. Prueba de $Chi^2 \leq 0,0001$ (Sp₁₋₂₋₃ × Tiempo de refrigeración, 24 h y 72 h).

Conclusiones

El presente estudio permitió validar la existencia de tres subpoblaciones espermáticas en semen de verraco refrigerado a 16 °C durante 72 h, mediante el análisis de variables cinéticas obtenidas con el sistema CASA. Se evidenció un efecto deletéreo del almacenamiento sobre la subpoblación caracterizada por un movimiento rápido y progresivo, lo que sugiere una disminución en el potencial fecundante tras la refrigeración. Además, se identificaron diferencias en los patrones de motilidad entre verracos, pese a que sus espermogramas clásicos no mostraron variaciones apreciables según la evaluación convencional. Estos hallazgos destacan la utilidad del análisis de subpoblaciones como una herramienta complementaria para detectar diferencias en la calidad seminal que no son perceptibles mediante métodos tradicionales. La combinación de CASA con análisis estadísticos multivariados permite una evaluación más precisa y objetiva de la motilidad espermática, aportando información relevante para la optimización del manejo reproductivo en porcicultura.

Declaración de autoría

- Decio González-Villalobos: Investigación, redacción del borrador original y revisión, y edición final del mismo.
- Armando Quintero-Moreno: conceptualización, adquisición de fondos, investigación, análisis formal, redacción del borrador original y revisión, y edición final del mismo.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa Productora Occidental Porcina C.A. (PROPORCA) por facilitar el uso de sus instalaciones y sus verracos para realizar este experimento.

Referencias bibliográficas

- Abaigar T., Holt W.V., Harrison R.A., del Barrio G. (1999). Sperm subpopulations in boar (*Sus scrofa*) and gazelle (*Gazella dama mhorr*) semen as revealed by pattern analysis of computer-assisted motility assessments. *Biology of Reproduction* 60(1): 32-41. <https://doi.org/10.1095/biolreprod60.1.32>

- Amann R.P. (1989). Can the fertility potential of a seminal sample be predicted accurately? *Journal of Andrology* 10: 89-98. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.1989.tb00066.x>
- Amann R.P., Waberski D. (2014). Computer-assisted sperm analysis (CASA): capabilities and potential developments. *Theriogenology* 81(1): 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.09.004>
- Bamba K. (1988). Evaluation of acrosomal integrity of boar spermatozoa by bright field microscopy using an eosin-nigrosin stain. *Theriogenology* 29: 1245-1251. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(88\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0093-691X(88)90004-0)
- Barquero V., Viquez L., Calderón-Calderón J., Valverde A. (2021). Frecuencia de fotogramas óptima para evaluar la cinética espermática de verracos con un sistema CASA-Mot. *Agronomía Mesoamericana*. 32(1):1-18. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.41928>
- Bompart D., Vázquez R.F., Gómez R., Valverde A., Roldán E., García-Molina A., Soler C. (2019). Combined effects of type and depth of counting chamber, and rate of image frame capture, on bull sperm motility and kinematics. 209: 106169. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2019.106169>
- Calatayud-Márquez D., Quintero-Moreno A. (2021). Características seminales de verracos alojados en ambiente controlado ubicado en trópico cálido. *Revista De Investigaciones Veterinarias Del Perú* 32(4): e19112. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i4.19112>
- Castellini C., Dal Bosco A., Ruggeri S., Collodel J. (2011). What is the best frame rate for evaluation of sperm motility in different species by computer-assisted sperm analysis? *Fertility and Sterility* 96: 24-27. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2011.04.096>
- Davis R.O., Drobnis E.Z., Overstreet J.W. (1995). Application of multivariate cluster, discriminate function and stepwise regression analyses to variable selection and predictive modeling of sperm cryosurvival. *Fertility and Sterility* 63(5): 1051-1057. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(16\)57547-5](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(16)57547-5)
- Dott H.M., Foster G.C.A. (1979). The estimation of sperm motility in semen, on a membrane slide, by measuring the area change frequency with an image analyzing computer. *Reproduction* 55(1): 161-166. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0550161>
- Fawcett D.W. (1970). A comparative view of sperm ultrastructure. *Biology of Reproduction* 2(Suppl. 2): 90-127. https://doi.org/10.1095/biolreprod2.Supplement_2.90
- Fernández-López P., Garriga J., Casas I., Yeste M., Bartumeus F. (2022). Predicting fertility from sperm motility landscapes. *Communications Biology* 5(1): 1027. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03954-0>
- Ferraz M.A. (2013). Evaluation of sperm subpopulation structure in relation to *in vitro* sperm-oocyte interaction and field fertility of frozen-thawed semen from Holstein bulls. (Tesis de máster). Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/40228>
- Flores E., Fernández-Novell J.E., Peña A., Rodríguez-Gil J.E. (2009). The degree of resistance to freezing-thawing is related to specific changes in the structures of motile sperm subpopulations and mitochondrial activity in boar spermatozoa. *Theriogenology* 72: 784-797. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2009.05.013>
- Foxcroft G.R., Dyck M.K., Ruiz-Sanchez A., Novak S., Dixon W.T. (2008). Identifying useable semen. *Theriogenology*. 70(8): 1324-1336. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.07.015>
- Gadea J., Sellés E., Marco M.A. (2004). The predictive value of porcine seminal parameters on fertility outcome under commercial conditions. *Reproduction in Domestic Animals* 39: 303-308. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2004.00513.x>
- Gravance C.G., Davis R.O. (1995). automated sperm morphometry analysis (ASMA) in the rabbit. *Journal of Andrology* 16: 88-93. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.1995.tb01736.x>
- Hackerova L., Pilsova A., Pilsova Z., Zelenkova N., Hegerova P.T., Klusackova B., Chmelikova E., Sedmikova M., Simonik O., Postlerova P. (2025). Boar sperm motility assessment using computer-assisted sperm analysis: current practices, limitations, and methodological challenges. *Animals* 54(2): 167-175. <https://doi.org/10.3390/ani15030305>

- Harrison R.A. (1996). Capacitation mechanisms, and the role of capacitation as seen in eutherian mammals. *Reproduction, Fertility and Development* 8(4): 581-594. <https://doi.org/10.1071/rd9960581>
- Henning H., Franz J., Batz-Schott J., Le Thi X., Waberski D. (2022). Assessment of chilling injury in boar spermatozoa by kinematic patterns and competitive sperm-oviduct binding *in vitro*. *Animals* 12: 712. <https://doi.org/10.3390/ani12060712>
- Hirai M., Boersma A., Hoefflich A., Wolf E., Föll J., Aumüller R., Braun J. (2001). Objectively measured sperm motility and sperm head morphometry in boars (*Sus scrofa*): relation to fertility and seminal plasma growth factors. *Journal of Andrology* 22: 104-110. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.2001.tb02159.x>
- Ibanescu J., Leiding C., Bollwein H. (2018). Cluster analysis reveals seasonal variation of sperm subpopulations in extended boar semen. *Journal of Reproduction and Development* 64(1): 33-39. <https://doi.org/10.1262/jrd.2017-083>
- Jung M., Rüdiger K., Schulze M. (2015). *In vitro* measures for assessing boar semen fertility. *Reproduction in Domestic Animals* 50 (Suppl. 2): 20-24. <https://doi.org/10.1111/rda.12533>
- King G.J., Macpherson J.W. (1973). A comparison of two methods for boar semen collection. *Journal of Animal Science* 36: 563-565. <https://doi.org/10.2527/jas1973.363563x>
- Lindemann C.B., Orlando A., Kanous K.S. (1992). The flagellar beat of rat sperm is organized by the interaction of two functionally distinct populations of dynein bridges with a stable central axonemal partition. *Journal of Cell Science* 102: 249-260. <https://doi.org/10.1242/jcs.102.2.249>
- Martínez-Pastor F., Tizado E.J., Garde J.J., Anel L., de Paz P. (2011). Statistical Series: Opportunities and challenges of sperm motility subpopulation analysis. *Theriogenology* 75(5): 783-795. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.11.034>
- Martínez-Pastor F. (2022). What is the importance of sperm subpopulations? *Animal Reproduction Science* 246: 106844. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2021.106844>
- Martín-Rillo S., Martínez E., García-Artiga C., de Alba C. (1996). Boar semen evaluation in practice. *Reproduction in Domestic Animals* 35: 519-526.
- Morales B., Quintero-Moreno A., Osorio-Meléndez C., Rubio-Guillén J. (2012). Valoración de la biometría de la cabeza del espermatozoide mediante análisis computarizado en semen de cerdo recién colectado y refrigerado. *Revista de la Facultad de Agronomía Universidad del Zulia (LUZ)*. 29: 413-431.
- Phillips D.M. (1970). Insect sperm: their structure and morphogenesis. *Journal of Cell Biology* 44(2): 243-277. <https://doi.org/10.1083/jcb.44.2.243>
- Quintero-Moreno A., Rigau T., Rodríguez-Gil J.E. (2004). Regression analyses and motile sperm subpopulation structure study as improving tools in boar semen quality analysis. *Theriogenology* 61(4): 673-690. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(03\)00248-6](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(03)00248-6)
- RAE (2001). Diccionario de la lengua española. Real Academia Española. Disponible en <http://www.rae.es/rae.html> (Consultado el 06/07/2024).
- Ramio L., Rivera M.M., Ramírez A., Concha I.I., Peña A., Rigau T., Rodríguez-Gil J.E. (2008). Dynamics of motile-sperm subpopulation structure in boar ejaculates subjected to "in vitro" capacitation and further "in vitro" acrosome reaction. *Theriogenology* 69: 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.10.021>
- Rivera M.M., Quintero-Moreno A., Barrera X., Palomo M.J., Rigau T., Rodríguez-Gil J.E. (2005). Natural Mediterranean photoperiod does not affect the main parameters of boar-semen quality analysis. *Theriogenology* 64: 934-946. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.01.001>
- Rodríguez-Monteaudo M., Avello-Martínez R., Avello-Rodríguez A. (2024). Análisis de clúster para la clasificación de pacientes atendidos en consulta de infertilidad. *Revista Cubana de Informática Médica* 16(1): e692
- Rozeboom K. (2003). Quality assurance of semen. En: *Leman Swine Conference* (Ed. Allen D.), pp. 171-179. Retrieved from the University Digital Conservancy. <https://hdl.handle.net/11299/146366>

- Sancho S. y Vilagran I. (2013). The boar ejaculate: sperm function and seminal plasma analyses. En: *Boar Reproduction: Fundamentals and New Biotechnological Trends*. 1ra Ed (Eds. Bonet S., Casas I., Holt W., Yeste M.). pp. 471-516. Springer-Verlag Berlin. Alemania. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35049-8_9
- Saputra D.M., Saputra D., Oswari L.D. (2020). Effect of distance metrics in determining K-value in k-means clustering using elbow and silhouette method. *Advances in Intelligent Systems Research*. 172: 341-346. <https://doi.org/10.2991/aisr.k.200424.051>
- SAS. (2004). *Statistical Analysis Software*. SAS Institute Inc. SAS/STAT © 9.1 User's Guide. Cary, NC. USA.
- Turner R.M. (2003). Tales from the tail: what do we really know about sperm motility? *Journal of Andrology* 24: 790-803. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.2003.tb03123.x>
- Valverde A., Madrigal M., Caldeira C., Bompart D., Núñez de Murga J., Arnau S., Soler C. (2018). Effect of frame rate capture frequency on sperm kinematic parameters and subpopulation structure definition in boars, analysed with a CASA Mot system. *Reproduction in Domestic Animals* 54: 167-175. <https://doi.org/10.1111/rda.13320>
- Yeste M., Bonet S., Rodríguez-Gil J.E., Rivera Del Álamo M.M. (2018). Evaluation of sperm motility with CASA-Mot: which factors may influence our measurements? *Reproduction, Fertility and Development* 30(6): 789-798. <https://doi.org/10.1071/rd17475>
- (Aceptado para publicación el 5 de noviembre de 2025)

Cultivo de plátano y aguacate en Canarias: una comparación de rentabilidades

José Juan Cáceres-Hernández*, Gloria Martín-Rodríguez, Dirk Godenau y José Ignacio González-Gómez

Facultad de Economía, Empresa y Turismo. Universidad de La Laguna.

Resumen

Este trabajo estima la rentabilidad del cultivo de plátano y aguacate en Canarias. La aplicación del enfoque de costes de actividad permite simular costes para producción convencional y ecológica al aire libre o bajo invernadero de acuerdo con hipótesis de rendimiento variables según vertiente y cota altitudinal, que también modifican la distribución estacional de la producción y los ingresos. Se concluye que el cultivo convencional de plátano bajo invernadero es el más rentable en las cotas altitudinales más bajas, mientras que la producción ecológica de aguacate al aire libre ofrece mayores márgenes por encima de cotas diferentes según vertiente.

Palabras clave: Cultivos tropicales, costes de actividad, estacionalidad de precios.

Banana and avocado crops in the Canary Islands: a profit comparison

Abstract

Profits are estimated for banana and avocado crops in the Canary Islands. Using an activity-based costing approach, costs are simulated for conventional and organic cultivation in open-air plots or greenhouses. Annual yields and the seasonal distribution of production and the corresponding revenues are assumed to depend on geographical orientation and altitude level. Conventional greenhouse banana cultivation is shown to be the most profitable option in lower altitude levels, whereas organic open-air avocado production provides the highest profit margins above different altitude levels depending on the geographical orientation.

Keywords: Tropical crops, activity-based costing, price seasonality.

Introducción

De acuerdo con los datos de la Contabilidad Regional de España para 2022, el sector primario en Canarias aporta actualmente me-

nos del 2 % del valor añadido bruto y genera menos del 3 % del número total de personas ocupadas. Esta baja participación es fruto de una tendencia iniciada hace décadas en la que, sin embargo, algunas producciones de

* Autor para correspondencia: jcaceres@ull.edu.es

Cita del artículo: Cáceres-Hernández J.J., Martín-Rodríguez G., Godenau D., González-Gómez J.I. (2025). Cultivo de plátano y aguacate en Canarias: una comparación de rentabilidades. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 121(4): 382-401. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.013>



exportación habían mantenido un cierto peso y continuaban resultando relevantes para determinados ámbitos geográficos del archipiélago. Y después de la brusca caída experimentada por las producciones tomateras (Cáceres-Hernández et al., 2018), y considerando que su hueco no ha sido cubierto por las exportaciones de otras hortalizas como el pepino, algunas flores como las próteas, o cultivos tropicales como la papaya o el aguacate, puede afirmarse que el plátano, ayudado por un marco institucional favorable, es el gran capítulo exportador agrario tradicional que todavía ofrece a sus productores cierto margen de rentabilidad a tenor de la relativa estabilidad de la superficie cultivada. Sin embargo, producciones de otras procedencias con costes de cultivo más bajos y unas desventajas en comercialización derivadas de su lejanía al mercado europeo que han ido menguando por los avances tecnológicos, amenazan seriamente su posición en el mercado peninsular español. En este contexto, la evolución reciente de las superficies de cultivo de aguacate en Canarias también sugiere que los agricultores que se han decantado por su producción tienen expectativas favorables. Y dado que los rendimientos por ha son muy inferiores a los obtenidos en cultivos como el plátano, cabe pensar en la existencia de un margen por unidad de producto que explique la expansión reciente de este cultivo tropical. Lo cierto es que las cifras de valor de la producción agraria en Canarias, incluyendo producción vegetal y animal, así como servicios agrarios, revelan que la contribución de los frutales tropicales en 2022 fue superior al 40 %. Y las estimaciones del valor de la producción de aguacate y plátano a precios percibidos por los productores permiten concluir que el plátano es el que más contribuye a esta cuota, mientras que la contribución del aguacate es también significativa. La relevancia de estos dos cultivos se aprecia también con claridad en las cifras de superficie y producción, pero su

evolución reciente es bastante dispar. La cuantía de las ayudas a los productores de plátano y su vinculación a la existencia de cantidades de referencia –asignadas a cada productor de acuerdo con su histórico de volúmenes de producción de los últimos años– suponen límites evidentes a la entrada de nuevos productores y al crecimiento de la superficie cultivada. Sin embargo, la superficie de cultivo de aguacate ha crecido de forma muy relevante en los últimos años (véase anexos I.a y I.b del material complementario).

Por supuesto, las estrategias de comercialización de la fruta canaria en los mercados tradicionales condicionan fuertemente la rentabilidad de estas producciones. Pero, en todo caso, y especialmente si se piensa en acudir a mercados exteriores en los que compiten las producciones de otros orígenes, un diagnóstico de las posibilidades futuras de estos dos cultivos debe fundamentarse también en un análisis detallado de la estructura de costes de cultivo de las explotaciones. El objetivo de este documento es efectuar estas estimaciones de costes de cultivo y, a partir de la comparación de dichos costes con los ingresos obtenidos por los productores, extraer conclusiones sobre la rentabilidad de ambas producciones.

La originalidad de este trabajo radica especialmente en que se tiene en cuenta que el rendimiento del cultivo de plátano o aguacate, ya sea al aire libre o bajo invernadero y con un tipo de producción convencional o ecológica, depende de la ubicación de la parcela en términos de vertiente y cota altitudinal, lo que condiciona el nivel de costes por unidad de producto. Por otra parte, se asume que la distribución semanal de las producciones a lo largo del año también depende de esta ubicación y, dada la fuerte estacionalidad de los precios, esta circunstancia influye notablemente en los ingresos de mercado. El planteamiento adoptado adquiere relevancia si se admite que la política agra-

ria de la Unión Europea se orienta cada vez más a favor de las producciones ecológicas. De hecho, también los consumidores parecen cada vez más concienciados de las ventajas del consumo de productos ecológicos, de un lado, porque contribuyen a frenar el deterioro del medio ambiente y, de otro, porque pueden ser productos más saludables. Desde este punto de vista, y teniendo en cuenta que todavía la mayor parte de las 9.000 ha dedicadas al cultivo de plátano se cultivan de modo convencional, podría ser interesante valorar hasta qué punto podría ser rentable en algunas parcelas sustituir la producción convencional por producción ecológica. Por otra parte, el cultivo de plátano cuenta con una larga tradición y desde hace algunas décadas la superficie de cultivo está estabilizada. Ahora bien, la rentabilidad de estas explotaciones está fuertemente condicionada por un régimen de ayudas que estimula, por una parte, el cultivo al aire libre con un importe fijo por unidad de superficie y, por otra, el cultivo bajo invernadero con ayudas por unidad de producto que benefician los cultivos de mayor rendimiento. En cualquier caso, la posibilidad de que estas ayudas no se mantengan y, sobre todo, la rentabilidad que están obteniendo otros cultivos de frutales tropicales, sugieren la conveniencia de evaluar las posibilidades de sustitución del cultivo del plátano por cultivos tropicales como el aguacate.

Material y métodos

En términos formales, el problema que se aborda puede formularse de la manera siguiente. El agricultor que gestiona una par-

cela ubicada en la vertiente i (norte o sur) y cota altitudinal j (apta para el cultivo de plátano o aguacate), se plantea elegir el cultivo k (plátano o aguacate) realizado en esa parcela, así como el sistema de cultivo (invernadero o aire libre) y del tipo de producción (convencional o ecológica), de modo que se maximice la rentabilidad esperada por unidad de superficie. Si esta rentabilidad esperada se denota como $R_{i,j}(k, l, m)$, se trata de determinar el cultivo k^* , el sistema de cultivo l^* y el tipo de producción m^* , tal que:

$$R_{i,j}(k^*, l^*, m^*) = \max_{k,l,m} \{R_{i,j}(k, l, m)\} \quad [1]$$

donde

$$R_{i,j}(k, l, m) = I_{i,j}(k, l, m) - C_{i,j}(k, l, m) \quad [2]$$

siendo $I_{i,j}(k, l, m)$ y $C_{i,j}(k, l, m)$ los ingresos y costes por unidad de superficie de la parcela.

Se asume que los costes de cultivo por unidad de superficie para un cultivo, sistema y tipo de producción determinado, dependen de la ubicación de la parcela de acuerdo con el efecto de dicha ubicación en los rendimientos por unidad de superficie. Estos efectos pueden evaluarse estimando los costes por unidad de superficie recurriendo al enfoque de costes de actividad¹, que implica cuantificar distintos componentes de costes fijos f , y también costes variables asociados a niveles de actividad en relación con distintas tareas o actividades t , de modo que:

$$C_{i,j}(k, l, m) = \sum_f CF_{i,j,f}(k, l, m) + \sum_t CV_{i,j,t}(k, l, m) \quad [3]$$

Y, dado que el desarrollo de cada actividad t implica el consumo de cierta cantidad del insumo n , con un precio unitario, p_n , el coste

1. La evolución del Activity-Based Costing (ABC) desde finales de los 80 del siglo pasado puede consultarse en Gosse- lin (2007). Algunas ventajas de la aproximación en empresas agrarias se indican en Stasova (2020) y algunas aplicaciones en el ámbito agrario son, entre otras, Lee y Kao (2001), González-Gómez y Morini-Marrero (2009), Raineri et al. (2015), Kabinlapat y Sutthachai (2017), Cáceres-Hernández et al. (2018) y Araújo et al. (2020).

por unidad de superficie derivado de esta forma puede ser expresado en términos de las cantidades consumidas de los diferentes insumos, $q_{i,j,n}^i(k, l, m)$, y sus precios unitarios, $p_{i,n}^i$, como sigue:

$$C_{i,j}(k, l, m) = \sum_f CF_{i,j,f}(k, l, m) + \sum_n q_{i,j,n}^i(k, l, m) p_{i,n}^i \quad [4]$$

Y tanto los rendimientos por unidad de superficie como su distribución semanal a lo largo del año inciden notablemente en los ingresos por unidad de superficie, dada la estacionalidad de los precios de mercado y, finalmente, de los precios percibidos por los productores, que se consideran independientes del sistema de cultivo, pero cambian en función del tipo de producción. A estos ingresos de mercado se les añaden las ayudas públicas, que cambian con el cultivo y el sistema de producción. Si los niveles de producción por unidad de superficie obtenidos en la parcela y los precios percibidos por esas producciones en cada semana del año w , se denotan como $q_{i,j,w}^i(k, l, m)$ y $p_{i,j,w}^i(k, m)$, mientras que las ayudas públicas por unidad de producto se denotan como $s_{i,j}(k, l)$, entonces:

$$I_{i,j}(k, l, m) = \sum_w p_{i,j,w}^i(k, m) q_{i,j,w}^i(k, l, m) + s_{i,j}(k, l) \sum_w q_{i,j,w}^i(k, l, m) \quad [5]$$

En los apartados siguientes se explican las fuentes de información y las hipótesis adoptadas para estimar tanto los costes como los ingresos.

Estimación de costes de cultivo

La aproximación a la función de producción del cultivo de plátano y aguacate desarrollada en Canarias se ha realizado a partir del juicio experto de ingenieros agrónomos. En concreto, para cada cultivo se aproximan 4 estructuras de costes (cultivo convencional o ecológico tanto bajo invernadero como al aire libre) para una finca modelo en una campaña agrícola definida entre septiembre de un año y agosto del año siguiente². Una vez evaluadas las necesidades físicas de insumos correspondientes a cada tarea, la aproximación al coste se efectuó tomando la información relativa a precios unitarios para la campaña 2023/2024 aportada por empresas productoras, proveedores o, en el caso de algunas inversiones, a partir de la información recogida en los baremos oficiales utilizados por las administraciones públicas para conceder ayudas a la financiación de tales inversiones. Se ha obtenido finalmente una cuantificación del importe total del coste medio por hectárea y por kilogramo producido hasta la salida de finca que puede definirse como una función variable de determinados parámetros que se ajusten a diferentes tipos de cultivo, intensidad en el uso de insumos o niveles de producción. En el material complementario, se explican con detalle determinados supuestos aplicados para la deducción de las estructuras de costes.

En particular, uno de los componentes fundamentales del coste está asociado a la mano de obra, de manera que se prestó especial atención a la estimación de las horas de actividad dedicadas a cada uno de los grupos

2. En la finca dedicada al cultivo de plátano, se asume que, una vez realizadas las tareas de sorribas y nivelaciones, preparación del terreno y plantación, se dispone de 3 hectáreas útiles en producción. En el caso de la finca dedicada al cultivo de aguacate se asume que esta superficie de cultivo asciende a 2 hectáreas. Las características generales de estas fincas se muestran en los anexos II.a y II.b del material complementario. Los equipamientos de las fincas se tienen en cuenta para determinar los costes que, en concepto de amortización, se atribuyen a cada año en función de las inversiones realizadas y el periodo de vida útil del elemento objeto de la inversión.

de tareas definidas en los anexos III.a y III.b del material complementario. Las horas de trabajo reflejadas en los anexos IV.a y IV.b del material complementario pueden corresponder en mayor o menor medida al trabajo propio realizado por el agricultor, que habitualmente no se tiene en cuenta para la evaluación del gasto. Pero cualquiera de esas horas implica un coste y se ha optado por valorar cada una de las horas de trabajo registradas como si todas ellas fueran realizadas por trabajadores asalariados.

Se ha tomado como referencia el salario base fijado de acuerdo con la cuantía del salario mínimo interprofesional para 2023, pero no se han considerado las retribuciones que según el convenio colectivo regional del campo se establecen por antigüedad, prima de asistencia o plus de distancia³. De todo ello, y considerando que un trabajador fijo realiza 1.826 horas anuales, resulta un salario equivalente a 8,28 €/h. Asumiendo por otra parte que el trabajador está integrado como trabajador fijo o fijo-discontinuo en el régimen general del régimen especial agrario de la Seguridad Social, y de acuerdo con las bases y tipos de cotización vigentes para el año 2023, el coste de seguros sociales para la empresa puede estimarse que asciende a 1,89 €/h⁴, de modo que el coste laboral por hora se situaría en 10,17 €/h. Por otra parte, el coste de la seguridad social del agricultor como trabajador autónomo cambia en función del ren-

dimiento monetario neto de la actividad. Asumiendo que la rentabilidad crece cuando aumenta el rendimiento por unidad de superficie, puede estimarse el margen de rentabilidad por hectárea en las situaciones de rendimiento mínimo y rendimiento máximo y, en cada caso, aproximar la cuantía de las cotizaciones sociales de acuerdo con la normativa en vigor en 2023. Aunque la normativa indicada establece un cambio de cuota por umbrales, si se asume que la cuantía de los seguros sociales de un trabajador por cuenta propia varía linealmente en función del rendimiento por unidad de superficie, puede entonces estimarse el coste de dichas cotizaciones de acuerdo con el rendimiento estimado para la parcela.

Por lo que respecta a otros insumos, uno de los de mayor repercusión es el agua de riego, aunque existen notables diferencias en consumo y precio del agua en distintas zonas de producción⁵. Otro capítulo relevante es el consumo de fertilizantes y productos fitosanitarios. En el caso de los fertilizantes, existen productos comerciales alternativos que pueden considerarse equivalentes en términos de los nutrientes finalmente incorporados a la planta, pero se ha optado por elegir el plan de abonado que se muestra en los anexos V.a y V.b del material complementario y cuyo coste final por unidad de superficie puede considerarse cercano a otras alternativas posiblemente aplicadas en otras fincas.

3. Véanse Real Decreto 99/2023, de 14 de febrero, por el que se fija el salario mínimo interprofesional para 2023, BOE 39, de 15/2/2023, y Resolución 4834 de la Dirección General de Trabajo, BOC 205 de 23 de octubre de 2018, por la que se dispone la inscripción, depósito y publicación del Convenio Colectivo de la empresa Regional del Campo. Nótese que el convenio no se ha actualizado, de modo que la remuneración salarial según convenio para un peón, incluyendo las tres pagas extras contempladas, resultaría inferior a las 14 pagas de salario mínimo interprofesional vigentes para el año 2023.

4. Las bases y tipos aplicables a los trabajadores agrarios se han tomado de la Orden PCM/74/2023, de 30 de enero, por la que se desarrollan las normas legales de cotización a la Seguridad Social, desempleo, protección por cese de actividad, Fondo de Garantía Salarial y formación profesional para el ejercicio 2023 (BOE 26, de 31 de enero de 2023), modificada por Orden PCM/313/2023, de 30 de marzo (BOE 77, de 31 de marzo de 2023).

5. El precio utilizado para los cálculos relativos a la campaña 2023/2024 fue de 0,58 €/m³.

Más compleja aún resulta la aproximación del empleo de productos fitosanitarios, sobre todo si se tiene en cuenta que los productos fitosanitarios pueden aplicarse con finalidades preventivas, pero también cuando aparecen problemas cuya incidencia exige recurrir a ellos. Las dosis consideradas en los anexos VI.a y VI.b del material complementario corresponderían a una campaña normal en términos de la incidencia de plagas y enfermedades. Además de materiales, energía, seguro agrario y servicios externos, otro capítulo relevante es la renta de la tierra, que pretende aproximar el coste de oportunidad derivado de dedicar el terreno al cultivo y no a otros usos alternativos y que se ha medido como el coste de arrendamiento de una hectárea sin preparación para el cultivo.

Además del coste por unidad de superficie, se deduce también la estructura de costes por unidad de producto para las hipótesis de rendimiento indicadas en las tablas 1 y 2 y referidas a la producción apta para la comercialización. Ahora bien, estas últimas estimaciones son muy sensibles a las hipótesis adoptadas en relación con los rendimientos por unidad de superficie que, incluso para el mismo sistema de producción, distan mucho de ser constantes en diferentes explotaciones y campañas y, por supuesto, cambian con la ubicación de la parcela (anexos VII.a, VII.b, VIII.a y VIII.b del material complementario). En cualquier caso y para ambas producciones, ocurre en general que en el cultivo protegido convencional, los rendimientos son mayores que en cultivo convencional al aire libre, mientras que tanto en cultivo protegido como en cultivo al aire libre se considera que los rendimientos en cultivo ecológico son inferiores a los obtenidos en cultivos convencionales.

Estimación de ingresos

Los ingresos que se espera obtener cuando se decide que una parcela se dedique a un cultivo determinado dependen claramente de los precios en el mercado en que se comercializa la producción, que, una vez deducidos los costes de comercialización y transporte correspondientes, determinan finalmente la cotización percibida por el agricultor. Los cultivos tropicales realizados en Canarias disfrutaban además de un régimen de ayudas que supone un complemento de mayor o menor cuantía a los ingresos de mercado. En concreto, el Programa Comunitario de Medidas de Apoyo a las Producciones Agrarias de Canarias establece en su medida II una ayuda a los productores de plátanos con una ficha financiera de 141,1 millones de euros que, una vez deducido el importe correspondiente al pago de 1.200 €/ha de cultivo al aire libre, se distribuye entre los productores atendiendo a sus cantidades de referencia⁶. Se ha estimado una ayuda promedio que oscila entre 0,335 €/kg para cultivo bajo invernadero y poco menos de 0,36 €/kg para cultivo convencional al aire libre o poco más de 0,36 €/kg para el cultivo ecológico al aire libre. Este mismo Programa Comunitario incluye en su medida I (apoyo a la producción vegetal) una acción I.1 (ayuda a la comercialización de frutas, hortalizas, raíces y tubérculos, flores y plantas vivas recolectados en Canarias) que contempla en la subacción I.1.1 (grupo de frutas y hortalizas) y, en concreto, en el grupo D (que incluye el aguacate), una ayuda a productores individuales de 81 €/t, que asciende a 90 €/t si el agricultor está asegurado, así como una ayuda a productores agrupados en Agrupaciones u Organizaciones

6. Los criterios de asignación de cantidades de referencia pueden consultarse en el texto consolidado del Programa de Opciones Específicas por el Alejamiento y la Insularidad para Canarias (POSEI-Canarias), publicado en el Reglamento UE 228/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de marzo de 2013, disponible en la página web del Gobierno de Canarias. Dado que estas ayudas están condicionadas a que el agricultor tenga asignada una cantidad de referencia, en general, las nuevas parcelas dedicadas al cultivo no disfrutaban de esta ayuda.

Tabla 1. Estructura de costes y estimación de ingresos para cultivo convencional a salida de finca.
 Table 1. Cost structure and revenue estimates for conventional cultivation at the farm gate.

	Cultivo de plátano					
	Invernadero			Aire libre		
	65.002			55.007		
Rendimiento (kg/ha)	€/ha	€/kg	%	€/ha	€/kg	%
Estructura de costes						
Mano de obra	14.121	0,2172	34,76	14.106	0,2564	39,00
Agua	4.865	0,0748	11,98	5.830	0,1060	16,12
Fertilizantes	4.198	0,0646	10,34	4.198	0,0763	11,61
Tratamientos	651	0,0100	1,60	593	0,0108	1,64
Materiales	1.331	0,0205	3,28	1.349	0,0245	3,73
Energía	635	0,0098	1,56	755	0,0137	2,09
Seguro agrario	372	0,0057	0,92	315	0,0057	0,87
Renta de la tierra	2.250	0,0346	5,54	2.250	0,0409	6,22
Amortizaciones	10.030	0,1543	24,69	4.602	0,0837	12,72
Servicios externos	772	0,0119	1,90	772	0,0140	2,13
Seguro autónomo	1.398	0,0215	3,44	1.398	0,0254	3,86
Total costes	40.622	0,6249	100,00	36.168	0,6575	100,00
Ingresos de mercado	41.427	0,6373	65,50	35.057	0,6373	64,07
Ayudas públicas	21.818	0,3357	34,50	19.663	0,3575	35,93
Total ingresos	63.245	0,9730	100,00	54.720	0,9948	100,00

	Cultivo de aguacate					
	Invernadero			Aire libre		
	15.000			14.000		
Rendimiento (kg/ha)	€/ha	€/kg	%	€/ha	€/kg	%
Estructura de costes						
Mano de obra	4.531	0,3021	19,67	4.362	0,3116	24,85
Agua	2.338	0,1559	10,15	2.771	0,1979	15,79
Fertilizantes	1.413	0,0942	6,13	1.525	0,1089	8,69
Tratamientos	559	0,0372	2,43	538	0,0385	3,07
Materiales	593	0,0395	2,58	593	0,0424	3,38
Energía	369	0,0246	1,60	414	0,0296	2,36
Seguro agrario	555	0,0370	2,41	518	0,0370	2,95
Renta de la tierra	1.500	0,1000	6,51	1.500	0,1071	8,55
Amortizaciones	9.202	0,6135	39,95	3.359	0,2399	19,14
Servicios externos	410	0,0273	1,78	410	0,0293	2,34
Seguro autónomo	1.563	0,1042	6,78	1.563	0,1116	8,90
Total costes	23.033	1,5355	100,00	17.553	1,2538	100,00
Ingresos de mercado	33.992	2,2661	94,64	31.726	2,2661	94,64
Ayudas públicas	1.924	0,1283	5,36	1.796	0,1283	5,36
Total ingresos	35.916	2,3944	100,00	33.521	2,3944	100,00

Nota: Se presenta la estructura de costes y la estimación de ingresos para cultivos con una ubicación óptima, que corresponde a cultivos realizados en la vertiente sur próximos a la costa.

Tabla 2. Estructura de costes y estimación de ingresos para cultivo ecológico a salida de finca.
 Table 2. Cost structure and revenue estimates for conventional cultivation at the farm gate.

	Cultivo de plátano					
	Invernadero			Aire libre		
	50.012			44.993		
Estructura de costes	€/ha	€/kg	%	€/ha	€/kg	%
Mano de obra	15.677	0,3135	34,61	15.316	0,3404	37,76
Agua	4.925	0,0985	10,87	5.891	0,1309	14,52
Fertilizantes	6.522	0,1304	14,40	6.522	0,1449	16,08
Tratamientos	1.246	0,0249	2,75	1.246	0,0277	3,07
Materiales	1.535	0,0307	3,39	1.658	0,0369	4,09
Energía	657	0,0131	1,45	777	0,0173	1,91
Seguro agrario	286	0,0057	0,63	257	0,0057	0,63
Renta de la tierra	2.250	0,0450	4,97	2.250	0,0500	5,55
Amortizaciones	10.030	0,2006	22,14	4.602	0,1023	11,35
Servicios externos	772	0,0154	1,70	772	0,0172	1,90
Seguro autónomo	1.398	0,0279	3,09	1.273	0,0283	3,14
Total costes	45.296	0,9057	100,00	40.564	0,9015	100,00
Ingresos de mercado	45.074	0,9013	72,86	40.551	0,9013	71,33
Ayudas públicas	16.786	0,3357	27,14	16.302	0,3623	28,67
Total ingresos	61.861	1,2369	100,00	56.853	1,2636	100,00

	Cultivo de aguacate					
	Invernadero			Aire libre		
	14.000			13.000		
Estructura de costes	€/ha	€/kg	%	€/ha	€/kg	%
Mano de obra	4.353	0,3110	18,82	4.184	0,3219	23,63
Agua	2.348	0,1677	10,15	2.783	0,2141	15,72
Fertilizantes	1.582	0,1130	6,84	1.697	0,1305	9,58
Tratamientos	573	0,0410	2,48	602	0,0463	3,40
Materiales	666	0,0476	2,88	666	0,0513	3,76
Energía	372	0,0266	1,61	417	0,0321	2,36
Seguro agrario	518	0,0370	2,24	481	0,0370	2,72
Renta de la tierra	1.500	0,1071	6,48	1.500	0,1154	8,47
Amortizaciones	9.245	0,6604	39,97	3.402	0,2617	19,22
Servicios externos	410	0,0293	1,77	410	0,0315	2,32
Seguro autónomo	1.563	0,1116	6,76	1.563	0,1202	8,83
Total costes	23.131	1,6522	100,00	17.705	1,3619	100,00
Ingresos de mercado	35.251	2,5179	95,15	32.733	2,5179	95,15
Ayudas públicas	1.796	0,1283	4,85	1.667	0,1283	4,85
Total ingresos	37.046	2,6462	100,00	34.400	2,6462	100,00

Nota: Se presenta la estructura de costes y la estimación de ingresos para cultivos con una ubicación óptima, que corresponde a cultivos realizados en la vertiente sur próximos a la costa.

de Productores de 162 €/t, que alcanza los 180 €/t para productores asegurados⁷. A efectos de simulación, puede estimarse como ayuda el promedio simple de estas cuantías, que resulta cercano a 0,13 €/kg.

A pesar de que la cuantía de estas ayudas públicas puede determinar que un cultivo sea o no rentable, la mayor parte de los ingresos corresponden a los ingresos obtenidos por la producción comercializada en el mercado y la estimación de estos ingresos exige tener en cuenta que se trata de cultivos con fuerte estacionalidad de las cotizaciones. En el caso del plátano pueden tomarse como referencia de precios percibidos por los agricultores los precios medios semanales publicados por el Observatorio de la Cadena Alimentaria del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España. Sin embargo, no parece adecuado utilizar esta información nacional como estimación de los precios para el aguacate producido en Canarias, puesto que también se cultiva en otras zonas de España, a diferencia de lo que ocurre con el plátano. Por esta razón, se ha optado por utilizar los precios semanales a salida de explotación agraria publicados desde 2016 hasta 2023 por el Instituto Canario de Estadística (anexo X del material complementario). En el caso del aguacate, parece existir una tendencia creciente alrededor de un comportamiento estacional bastante estable. Sin embargo, la evolución observada para el precio del plátano es más irregular.

Por ejemplo, los precios son anormalmente bajos en 2023. En este sentido, y considerando este año como anómalo, a efectos de evaluación de los ingresos esperados en ese año se ha optado por realizar una estimación de precios recurriendo a funciones spline cambiantes ajustadas a cada uno de los años. En el caso del aguacate, y teniendo en cuenta también cierta variabilidad de las cotizaciones, se han aproximado los precios semanales del año 2023 recurriendo también a este tipo de funciones⁸.

Además, la percepción de un diferencial de calidad entre producción convencional y ecológica hace que en la práctica las cotizaciones también estén diferenciadas. Pues bien, para aproximar la cuantía de la prima correspondiente al carácter ecológico del producto, se han comparado los precios medios liquidados a los agricultores que entregan la fruta producida de una u otra manera a dos empresas comercializadoras. Considerando las producciones y precios registrados en cada una de las campañas del quinquenio 2018-2022, se han estimado las desviaciones de los precios correspondientes a ambas producciones respecto del precio medio para el conjunto de la fruta. A partir de estas estimaciones, se ha asumido finalmente que la prima para la producción ecológica con respecto al precio medio es del 40 % en el caso del plátano y del 10 % en el caso del aguacate, mientras que la producción convencional obtendría una cotización que se desvía por debajo del

7. Para 2024 se han incrementado ligeramente los importes correspondientes a estas ayudas hasta 89, 99, 178 y 198 €/t (Extracto de la Orden de 30 de noviembre de 2023, BOC 246, de 18 de diciembre de 2023).

8. En concreto, se ha ajustado una función spline cúbica periódica (Cáceres-Hernández y Martín-Rodríguez, 2017) a los precios semanales registrados en cada uno de los 8 años y se ha utilizado entonces el procedimiento siguiente. En el caso del plátano, se ha optado por considerar como patrón estacional típico el correspondiente a 2017, caracterizado por un fuerte descenso de las cotizaciones en el periodo estival. En el caso del aguacate, se ha considerado como patrón estacional típico el correspondiente a 2019, caracterizado por un fuerte incremento de los precios después del periodo estival. A las variaciones estacionales estimadas mediante la spline ajustada al año considerado como típico, se ha añadido un precio medio definido como resultado de calcular el promedio ponderado de los precios registrados entre 2018 y 2022.

precio medio en un 1 %. Los precios finalmente considerados para la simulación de ingresos se muestran en el gráfico del anexo XI del material complementario.

Dada la estacionalidad de las cotizaciones, la rentabilidad del cultivo está fuertemente condicionada por la estacionalidad de las producciones y el grado en que los máximos de producción se corresponden con las épocas del año de mejores cotizaciones en el mercado. En el caso del plátano, las memorias anuales de la asociación de organizaciones de productores de plátano de Canarias (ASPROCAN) publican datos semanales de producción comercializada. Para el aguacate no se dispone de información oficial de la producción por semana, de modo que la distribución semanal de las producciones comercializadas sólo puede aproximarse a partir de las informaciones registradas por empresas comercializadoras. Por supuesto, esta distribución depende también de la variedad cultivada, como ilustra para el caso andaluz el informe elaborado por la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 2024). En ambos cultivos, los datos disponibles revelan la existencia de años buenos y malos y también la existencia de fuertes variaciones entre diferentes periodos del año. Ahora bien, la ubicación de la parcela en términos de vertiente y cota altitudinal puede determinar el grado en que los máximos de producción puedan forzarse a coincidir con los momentos de mejores precios. En concreto, se asume que la zona apta para el cultivo de plátano corresponde a las parcelas agrarias ubicadas en cotas no superiores a 300 m sobre el nivel del mar en la vertiente norte y no superiores a 400 m sobre el nivel del mar en la vertiente sur. En cambio, en el caso del aguacate, se asume como apta la superficie ubicada en cotas no superiores a 600 m sobre el nivel del mar en ambas vertientes. Y debido a la incidencia de las condiciones climáticas, cabe formular hipótesis que impliquen más capa-

cidad de arrastrar hacia el invierno los máximos de producción en las fincas que se sitúan más próximas a la costa y especialmente en la vertiente sur de la isla.

El procedimiento utilizado para estimar el rendimiento y la distribución estacional de la producción en función de vertiente y cota altitudinal de la parcela es el siguiente. En primer lugar, se ha formulado un supuesto sobre la semana en la que se obtiene la máxima producción, que, para cada cultivo, depende de la vertiente y cota de la parcela. En particular y para cada cultivo y vertiente se establece un rango de semanas de máximo rendimiento. Se asume entonces que la semana de máximo rendimiento varía linealmente con la cota de la parcela entre los valores considerados para las cotas mínima y máxima, considerando siempre la parte entera del valor ajustado de la función lineal correspondiente. En concreto, los rangos de semanas de máximo rendimiento fueron los recogidos en el anexo XII del material complementario. Entonces, se ha optado por distribuir la producción entre las semanas anteriores y posteriores a esa semana de rendimiento máximo como si los pesos relativos de las producciones por semana se ajustaran a una distribución normal con media en la semana de máximo rendimiento y desviación típica de 6, de modo que la producción estimada para las semanas más lejanas de la de rendimiento máximo fuera prácticamente nula. Las distribuciones obtenidas por semana de las producciones anuales se muestran en el anexo XIII del material complementario.

Resultados

Estimación de costes de cultivo

De acuerdo con los criterios comentados en el apartado anterior, se exponen a continuación las estructuras de costes de cultivo en cada uno de los cuatro sistemas de produc-

ción considerados. Además del coste por unidad de superficie, se deduce también la estructura de costes por unidad de producto. Estas estructuras de costes para cultivo convencional se reflejan en la tabla 1⁹. En cultivo protegido de plátano, el principal componente del coste de cultivo es la mano de obra, que supone más de 14.000 €/ha y cerca de 0,22 €/kg. Para el cultivo protegido de aguacate, con menor intensidad de mano de obra por unidad de superficie, el coste laboral significa unos 4.500 €/ha que, dados los menores rendimientos, se traducen sin embargo en un coste de 0,30 €/kg. Otro capítulo importante es el agua de riego, que supone en términos medios unos 0,07 €/kg en el cultivo de plátano y más de 0,15 €/kg en cultivo de aguacate. La aportación de los fertilizantes, incluyendo aportes de materia orgánica, supera los 0,06 €/kg de plátano y los 0,09 €/kg de aguacate; mientras que la contribución de los productos fitosanitarios es de 0,01 € y de casi 0,04 € en cada uno de estos dos cultivos. Energía, servicios externos, materiales y seguro agrario tienen contribuciones al coste por unidad de producto de menor magnitud en el cultivo de plátano que en el cultivo de aguacate. La contribución del seguro autónomo al coste por unidad de superficie disminuía con el tamaño de la explotación, pero esta circunstancia se modificó desde que la cotización se hizo depender de la rentabilidad neta de la explotación agraria. En cuanto a la renta de la tierra, habitualmente no computada por los agricultores propietarios de la tierra, su contribución al coste unitario es significa-

tiva, sobre todo en el caso del aguacate a pesar del menor importe asignado por unidad de superficie. Y a pesar de la innegable arbitrariedad de los criterios utilizados para cuantificar las amortizaciones, lo cierto es que también constituyen un ingrediente cuya relevancia es difícilmente discutible.

En cualquiera de los dos cultivos, dos de los elementos que en mayor medida explican las diferencias en términos de costes de cultivo entre distintos sistemas son el peso relativo de las amortizaciones y el efecto de los rendimientos en los costes por unidad de producto. El resultado final es que en cultivo protegido convencional se obtiene finalmente un coste por kg de plátano superior a los 0,62 €¹⁰, mientras que en cultivo al aire libre este coste asciende a casi 0,66 €/kg a salida de finca. Por su parte, en el caso del cultivo de aguacate bajo invernadero, se obtiene un coste por kg inferior a 1,54 €¹¹. Sin embargo, en cultivo al aire libre el coste por kg a salida de finca se reduce hasta algo más de 1,25 €.

Las diferencias de rendimiento también se traducen en costes por unidad de producto mayores para el cultivo ecológico. El resultado final es que el coste a salida de finca en cultivo ecológico de plátano se acerca a los 0,90 €/kg neto tanto en cultivo protegido como en cultivo al aire libre (tabla 2). Sin embargo, en el caso del cultivo ecológico de aguacate (tabla 2), el menor coste de amortización termina por producir un coste unitario más bajo en cultivo al aire libre (1,36 €/kg neto) que en cultivo protegido (1,65 €/kg neto).

9. El detalle de las estructuras de costes puede consultarse en los anexos IX.a y IX.b del material complementario.

10. Conviene señalar que no se está incluyendo el arrastre de la fruta hasta el empaquetado, que se ha considerado un coste imputable a la comercialización y que podría significar entre 0,015 y 0,02 €/kg.

11. Tampoco se está incluyendo el arrastre de la fruta hasta el empaquetado, que se ha considerado un coste imputable a la comercialización y que podría significar alrededor de 0,015 €/kg.

Aproximación a los márgenes de rentabilidad

Las hipótesis de rendimiento y distribución estacional de la producción para una parcela con una ubicación determinada permiten deducir sus ingresos esperados atendiendo al comportamiento de los precios semanales recogido en el anexo XI del material complementario en función del cultivo realizado (plátano o aguacate), el sistema de cultivo elegido (bajo invernadero o al aire libre) y el tipo de producción obtenida (convencional o ecológica). Por otra parte, a partir de las estimaciones de costes de cultivo según sistema y tipo de producción obtenidas como se ha comentado, el enfoque de costes de actividad permite evaluar la modificación de los costes aparejados al cambio de rendimientos derivado de la ubicación de la parcela. Y la comparación de ingresos de mercado y ayudas públicas con los costes de cultivo estimados ofrece, a su vez, una aproximación a las rentabilidades relativas por unidad de superficie. Las tablas 1 y 2 muestran estas estimaciones de costes e ingresos para parcelas con ubicaciones en vertiente sur próximas a la costa. Los anexos XIV.a y XIV.b del material complementario muestran con mayor detalle la información sobre márgenes de rentabili-

dad en parcelas dedicadas al cultivo de plátano y de aguacate que se muestra en los anexos XV.a y XV.b. A partir de esta información, en la tabla 3 se identifica el cultivo y el sistema de cultivo que proporciona mayor rentabilidad en distintas vertientes y cotas altitudinales.

Discusión

Estimación de costes de cultivo

Como ya se ha comentado, uno de los insumos que más contribuye al coste final del producto es la mano de obra y, dado que no se consideran diferencias en el salario por hora entre un cultivo y otro, las diferencias en costes por unidad de superficie están directamente vinculadas a las necesidades de factor trabajo. En el caso del plátano, el número promedio de horas de mano de obra por hectárea resultante de agregar las estimaciones por tarea está cerca de 1.400 en cultivo convencional y de 1.500 en cultivo ecológico¹². En el caso del aguacate, mucho menos intensivo en mano de obra, el recuento de horas promedio de mano de obra por hectárea oscila entre 400 y 450¹³.

12. Según Cáceres-Hernández et al. (2012), y de acuerdo con los partes diarios de trabajo cumplimentados por los trabajadores de una muestra de parcelas en el año 2010, se requieren, en términos medios, unas 1.127 horas de actividad por hectárea, sin incluir las horas de transporte al empaquetado. Ahora bien, se trata de fincas en las que se cultiva la variedad Pequeña Enana, lo que puede significar menores necesidades de factor trabajo en labores de mantenimiento de la planta con respecto a variedades de mayor porte como Gran Enana. Además, el número medio de plantas es de 1.600 por ha. Las fincas están ubicadas en el norte de Tenerife por debajo de la cota 250 m, y mayoritariamente se cultivan al aire libre con un rendimiento medio superior a los 48.000 kg/ha. Por otra parte, en las explotaciones consideradas se utilizaba un sistema de remuneración por ajuste de jornada que implicaba trabajar 5 h/día a mayor ritmo y percibir la remuneración equivalente a un trabajo de 7 h/día.

13. Según Rodríguez-Sosa y Cáceres-Hernández (2014), y para una finca al aire libre con rendimientos de 12.000 kg/ha en 2013, se requieren, en términos medios, algo más de 380 h/ha, sin incluir las horas de transporte al empaquetado. A pesar de las distintas hipótesis de rendimientos, se estima también que las horas de recolección están cerca de 229 h/ha. Sin embargo, las diferencias en las necesidades de factor trabajo se producen sobre todo en relación con las horas de riego y abonado, que pueden explicarse por las hipótesis relativas a las necesidades hídricas en el trabajo citado (menos de 4000 m³/ha-año).

Tabla 3. Cultivos y sistemas más rentables según ubicación de la parcela (€/ha).
 Table 3. Most profitable crops and systems according to the location plot (€/ha).

Vertiente	Cota	Cultivo	Sistema	Producción	Rentabilidad (€/ha)
Norte	0	Plátano	Invernadero	Convencional	17.974
	50	Plátano	Invernadero	Convencional	17.230
	100	Plátano	Invernadero	Convencional	16.336
	150	Plátano	Invernadero	Convencional	14.782
	200	Plátano	Invernadero	Convencional	12.996
	250	Plátano	Invernadero	Convencional	10.878
	300	Aguacate	Aire libre	Ecológica	8.980
	350	Aguacate	Aire libre	Ecológica	8.363
	400	Aguacate	Aire libre	Ecológica	7.852
	450	Aguacate	Aire libre	Convencional	7.280
	500	Aguacate	Aire libre	Convencional	6.878
	550	Aguacate	Aire libre	Convencional	6.311
	600	Aguacate	Aire libre	Convencional	5.962
Sur	0	Plátano	Invernadero	Convencional	22.623
	50	Plátano	Invernadero	Convencional	22.005
	100	Plátano	Invernadero	Convencional	28.350
	150	Plátano	Invernadero	Convencional	20.865
	200	Plátano	Invernadero	Convencional	20.009
	250	Plátano	Invernadero	Convencional	18.768
	300	Plátano	Invernadero	Convencional	17.088
	350	Plátano	Invernadero	Convencional	15.039
	400	Plátano	Invernadero	Convencional	12.804
	450	Aguacate	Aire libre	Ecológica	10.508
	500	Aguacate	Aire libre	Ecológica	9.870
	550	Aguacate	Aire libre	Ecológica	9.232
	600	Aguacate	Aire libre	Ecológica	8.310

El capítulo de amortizaciones es el que más diferencias supone entre cultivo protegido y cultivo al aire libre. Con los criterios adoptados, la estructura y cubierta del invernadero supone un coste anual en cultivo convencional protegido de casi 0,10 €/kg de plátano y casi 0,43 €/kg de aguacate, mientras que el uso de cortavientos y las mayores exigencias de entutorado suponen unos 0,02 €/kg en cultivo al aire libre de plátano y en el caso del aguacate la inversión en cortavientos significa más de 0,04 €/kg.

Ahora bien, las desviaciones en términos de costes por unidad de producto se ven también afectadas por las distintas hipótesis de rendimiento para cultivo convencional. Así, en el apartado de mano de obra las necesidades de horas de actividad por hectárea son muy similares en el caso del plátano y, sin embargo, el coste por kg es casi 0,04 € más

alto que en cultivo protegido¹⁴. En el caso del aguacate, con necesidades de trabajo algo menores, este coste por unidad de producto es 0,01 € más alto en cultivo al aire libre¹⁵. En el caso del agua, además de la diferencia de rendimientos, la diferencia en el coste por kg responde también al incremento de necesidades de riego, que también se deja sentir en el consumo de electricidad. El resultado final es que en cultivo protegido convencional de plátano, a pesar de los mayores costes por unidad de superficie, se obtiene finalmente un coste por kg de plátano a salida de finca inferior al obtenido para el cultivo al aire libre¹⁶ (tabla 1). Sin embargo, en el caso del cultivo de aguacate, la disminución en el coste de amortizaciones en cultivo al aire libre parece compensar el efecto de la reducción de rendimientos respecto al cultivo protegido y, en consecuencia, el coste por kg a salida de finca se reduce¹⁷ (tabla 1).

14. Cáceres-Hernández et al. (2010 y 2012), a partir de las mismas explotaciones al aire libre, sitúan este coste entre 0,27 y 0,30 €/kg producido para las campañas 2009 y 2010. En el estudio de CapGemini (2009), se estima que el coste de la mano de obra se sitúa entre 0,20 y 0,38 €/kg. Por su parte, según indican Gutiérrez Mejía et al. (2017), el salario mínimo mensual del convenio bananero en Colombia en el año 2015 sería inferior a 500 €, al tipo de cambio del año en cuestión; y, a pesar de los incrementos de los últimos años, seguiría situándose por debajo de ese nivel a los tipos de cambio actuales. El salario mínimo mensual para los trabajadores del banano en Ecuador se situaría también por debajo de ese límite.

15. Rodríguez-Sosa y Cáceres-Hernández (2014) estiman, para explotaciones al aire libre, un coste laboral de 0,2781 €/kg, aunque el número de horas de actividad por ha considerado en este otro trabajo fue inferior (384 h) y también fue más baja la hipótesis de rendimiento (12.000 kg/ha). Con un rendimiento de 9.400 kg/ha, la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca del Gobierno de Canarias estima un coste de la mano de obra de 3.250 €/ha, equivalentes a casi 0,35 €/kg.

16. Cáceres-Hernández et al. (2012) estiman para la campaña 2010 un coste total en cultivo convencional al aire libre de 0,57 €/kg comercializable. Por su parte, CapGemini (2009) estima unos costes de cultivo, incluyendo el transporte hasta empaquetado, que podrían variar entre 0,46 y 0,83 €/kg para el año 2008. En cualquier caso, son costes mucho más elevados que los obtenidos en otras zonas [Martins et al. (2010), Brito et al. (2020) y Turco et al. (2022), para Brasil; Castro et al. (2015), Lalangui Balcázar y Gutiérrez Jaramillo (2018) y Cedeño et al. (2020) para Ecuador; o Meya et al. (2023) para Tanzania].

17. Rodríguez-Sosa y Cáceres-Hernández (2014) estiman un coste total en cultivo convencional al aire libre de 0,92 €/kg comercializable. Además de los cambios en los precios unitarios de los insumos, un desglose por capítulos revela que la diferencia en el coste total puede atribuirse especialmente al apartado de amortizaciones, puesto que se está considerando una finca de 1 ha y sólo se incluye la instalación de riego, la plantación y preparación del terreno y un vehículo, pero no se contempla maquinaria agrícola, ni tampoco estanque, almacén, sorribas o cortavientos. Se asume también que esta parcela forma parte de una explotación más amplia y por esa razón no se imputó el coste correspondiente al seguro autónomo del agricultor. Además, se asume un precio y unas necesidades

Para el cultivo ecológico de plátano (tabla 2), en el capítulo de amortizaciones, los costes por unidad de superficie son los mismos que en cultivo convencional, pero los menores rendimientos respecto al cultivo convencional producen incrementos de casi 0,05 y 0,02 €/kg en cultivo protegido y al aire libre, respectivamente. Este incremento es especialmente acentuado en el apartado de mano de obra, puesto que hay que tener también en cuenta las mayores necesidades de mano de obra por unidad de superficie, lo que significa finalmente un aumento de unos 0,09 €/kg tanto en cultivo protegido como en cultivo al aire libre. Los requerimientos de agua también son algo mayores, pero, aunque la diferencia en coste por ha no es tan relevante, finalmente significa un aumento próximo a los 0,03 €/kg. Y también se producen incrementos relevantes en los costes por ha, así como sobre todo en los costes por unidad de producto, en los apartados de fertilizantes y productos fitosanitarios. En concreto, el coste por kg correspondiente a cada uno de estos dos conceptos más que se duplica. Otros componentes con similar coste por hectárea tienen también mayor impacto en el coste por kg. Finalmente, los menores costes de amortización en cultivo ecológico al aire libre pesan poco más que el efecto de los menores rendimientos y el coste por kg neto a salida de finca en cultivo ecológico bajo invernadero apenas supera al estimado para cultivo ecológico al aire libre.

En el caso del cultivo de aguacate (tabla 2), aunque las necesidades de insumos para fer-

tirrigación y tratamientos durante los años previos a la etapa de plena producción son ligeramente más elevados en cultivo ecológico, los demás conceptos del capítulo de amortizaciones tienen la misma cuantía por unidad de superficie que en cultivo convencional, pero producen incrementos de 0,05 y 0,02 €/kg en cultivo protegido y al aire libre, respectivamente. Sin embargo, y a pesar de la relevancia de la tarea de recolección en el total de horas de actividad en cultivo, la reducción de rendimientos en cultivo ecológico implica una reducción del coste de la mano de obra por unidad de superficie que no llega a compensar el efecto sobre los costes por unidad de producto. Así, finalmente el incremento de costes de mano de obra apenas alcanza los 0,01 €/kg tanto en cultivo protegido como en cultivo al aire libre. Los requerimientos de agua también son bastante parecidos, pero, aunque la diferencia en coste por ha no es relevante, finalmente significa un aumento inferior a los 0,02 €/kg. Y también se producen incrementos en los costes por ha, así como sobre todo en los costes por unidad de producto, en los apartados de fertilizantes y productos fitosanitarios. En concreto, el coste por kg correspondiente a cada uno de estos dos conceptos aumenta en torno a 0,02 € y 0,01 €, respectivamente. Otros componentes con similar coste por hectárea tienen también mayor impacto en el coste por kg. Finalmente, el coste a salida de finca en cultivo ecológico bajo invernadero está 0,29 €/kg neto por encima del coste para cultivo ecológico al aire libre, en el que los menores costes de

algo inferiores de agua de riego. Por su parte, la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca estima un coste por unidad de superficie –algo más de 16.500 €/ha– muy similar al registrado en la tabla 1 para cultivo convencional al aire libre, pero la diferencia en la hipótesis de rendimiento se traduce en un coste por kg de 1,76 € (Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2022). Y la Junta de Andalucía obtiene para la campaña 2022/23 un coste unitario de 1,5 €/kg con un rendimiento medio de 5.658 kg/ha (véase Junta de Andalucía, 2025). Son, en cualquier caso, costes unitarios mucho más altos que los obtenidos para el continente americano [Flores Rondón y Guillén Vidal (2020), para Chile, Colombia y Perú; Franco Sánchez et al. (2018) y Carrillo (2021), para México, y Vásquez-Aguilar y García-Hevia (2021), para Ecuador].

amortización terminan más que compensando el efecto de los menores rendimientos.

Aunque las estimaciones obtenidas están obviamente condicionadas por la representatividad que pudieran tener con respecto al conjunto de explotaciones de Canarias, y sin perder de vista tales condicionantes, es posible deducir algunas conclusiones. En primer lugar y con respecto a las diferentes contribuciones a los costes de cultivo, parece clara la relevancia de la mano de obra, aunque su incidencia se reduce a medida que aumenta la productividad del factor trabajo. Es decir, cuando aumenta la producción por hora trabajada, como ocurre en los sistemas de mayor rendimiento por unidad de superficie, se reduce el impacto de este componente en el coste final a salida de finca. De ahí que la decisión de pasar de cultivo al aire libre a cultivo protegido dependa del balance entre el incremento de costes por unidad de superficie que refleja el capítulo correspondiente de amortizaciones y el descenso de costes por unidad de producto aparejado al incremento de rendimientos. En otras palabras, sólo un incremento suficiente de los rendimientos por unidad de superficie puede justificar la inversión en instalación de invernadero, al menos desde el punto de vista de los costes de producción.

En segundo lugar, los costes unitarios en cultivo ecológico son más altos que en cultivo convencional. Aunque el signo de la diferencia en términos de horas de actividad es desigual en función del cultivo considerado, este incremento es sobre todo resultado de los menores rendimientos por unidad de superficie. Por lo tanto, en términos de la rentabilidad de la actividad productiva, la producción ecológica sólo se justifica si trae aparejada un incremento importante de los ingresos por unidad de producto, ya sea como consecuencia de una mejora de las cotizaciones de mercado o también de la mayor cuantía de las subvenciones públicas.

Estimación de márgenes de rentabilidad

En el caso del cultivo convencional de plátano, como ya se comentó, el incremento de rendimientos en cultivo bajo invernadero compensa el incremento de costes de cultivo por unidad de superficie y el coste unitario resulta inferior al correspondiente coste de cultivo unitario al aire libre. Aunque en este caso la ayuda pública por kg es algo mayor, dado que el rendimiento es mayor en cultivo protegido y no se asumen diferencias de precio unitario, resulta entonces que el margen de rentabilidad por unidad de superficie es menor en cultivo al aire libre. Y tanto en la vertiente norte como en la vertiente sur, el descenso de rendimientos asociado al aumento de la cota altitudinal se traduce en una reducción progresiva de los márgenes de rentabilidad. Este descenso de márgenes con el incremento de la altitud de la parcela se observa también en ambas vertientes en el caso del cultivo ecológico. Ahora bien, como también se comentó, en el caso de la producción ecológica de plátano la diferencia de rendimientos entre cultivo protegido y cultivo al aire libre no resulta suficiente para compensar el diferencial de costes por unidad de superficie, de modo que el coste unitario es algo menor en cultivo al aire libre. Pues bien, a pesar del descenso de rendimientos, el cultivo ecológico al aire libre llega a aportar ahora mayores márgenes de rentabilidad que el cultivo protegido en las cotas más altas. En cualquier caso, el descenso de rendimientos cuando aumenta la cota altitudinal termina por hacer que el cultivo ecológico de plátano no sea rentable en la vertiente norte si la parcela se ubica en una cota próxima a 300 m sobre el nivel del mar.

Por lo que respecta al cultivo de aguacate, el comportamiento es algo diferente del observado para el plátano. Ya se comentó que, tanto en producción convencional como en producción ecológica, el cultivo de aguacate al aire libre permitía obtener la unidad de

producto a menor coste. Y el correspondiente diferencial de coste por unidad de superficie no se compensa con el incremento de ingresos por hectárea asociado al aumento de rendimientos en cultivo convencional en el rango de cotas altitudinales consideradas para ambas vertientes. Así, en ausencia de cambios en el ingreso unitario, los márgenes de rentabilidad son mayores en cultivo al aire libre. Por otra parte, la producción ecológica al aire libre ofrece márgenes de rentabilidad superiores a la producción convencional, aunque las diferencias entre uno y otro tipo de producción terminan por invertirse en las cotas superiores a 450 m sobre el nivel del mar en la vertiente norte, pero no en la vertiente sur. En cualquier caso, los márgenes descienden en ambas vertientes a medida que aumenta la cota altitudinal, aunque el cultivo convencional y ecológico resulta rentable en cualquiera de las cotas aptas para el cultivo de aguacate.

Para una parcela determinada, identificada por su ubicación en términos de vertiente y cota altitudinal, la comparación de las rentabilidades esperadas para distintos cultivos y sistemas de producción permite deducir si es más rentable destinar la parcela al cultivo de plátano o de aguacate, si el invernadero produce o no mayor rentabilidad y, finalmente, si obtener producto ecológico supone o no un margen mayor. En este sentido, como se indica en la tabla 3, el cultivo convencional de plátano bajo invernadero es el más rentable en las cotas más bajas de ambas vertientes. Sin embargo, aunque las parcelas ubicadas a 300 m sobre el nivel del mar en la vertiente norte todavía se consideran aptas para el cultivo de plátano, resulta que en las parcelas ubicadas en esta vertiente en cotas entre 300 y 400 m es más rentable el cultivo ecológico de aguacate al aire libre, mientras que a partir de 450 m la opción más rentable es el cultivo convencional de aguacate al aire libre. En la vertiente sur, el cultivo convencional de plátano bajo invernadero es la elec-

ción más rentable en todas las cotas altitudinales para las que este cultivo se considera apto, mientras que a partir de 400 m sobre el nivel del mar el cultivo ecológico de aguacate al aire libre es el más rentable.

Conclusiones

Los resultados obtenidos apuntan a la mayor rentabilidad del cultivo de plátano con respecto al aguacate en zonas de costa, mientras que para cotas altitudinales todavía bajas el aguacate termina por convertirse en un cultivo más rentable en la zona norte y sólo para cotas altas en la vertiente sur. En el caso del plátano el diferencial de ingresos no compensa los mayores costes de cultivo de la producción ecológica, pero este modo de producción ofrece mayores márgenes en cultivo de aguacate en cotas bajas. Además, el cultivo protegido de plátano ofrece un aumento de rendimientos e ingresos por unidad de superficie que más que compensa el incremento de costes con respecto al cultivo al aire libre. Sin embargo, esta modalidad de cultivo es la más ventajosa para el cultivo de aguacate.

Por supuesto, estos resultados deben interpretarse con suma cautela. En primer lugar, las estructuras de costes están muy condicionadas por los supuestos adoptados, aunque el procedimiento utilizado permite generar una función de costes, de modo que sea posible obtener cifras de costes adaptadas a las características concretas de cualquier explotación. En este sentido, más que la cifra final de costes, es relevante advertir el efecto en esa cuantía que generan los cambios en las instalaciones, en el desempeño de las tareas y en el rendimiento final obtenido. Ahora bien, las hipótesis de cambio de rendimiento y distribución semanal de la producción según vertiente y cota podrían responder con más precisión a la realidad si se dispusiera de información concreta sobre las estructuras

de costes y la estacionalidad de las producciones en distintas ubicaciones de las parcelas.

Estas hipótesis tienen además un impacto en el ingreso bajo el supuesto de que sólo el carácter ecológico o convencional de la producción tiene incidencia en las cotizaciones percibidas por el agricultor. Sin embargo, la calidad de cada una de estas dos producciones dista mucho de ser uniforme y también pueden obtenerse cotizaciones muy diferentes en función del canal de comercialización elegido por la empresa comercializadora. La producción de plátano se exporta mayoritariamente al mercado peninsular, que sufre una competencia creciente de la banana centroamericana; y el sostenimiento de un diferencial de precios entre ambos productos depende de la percepción de calidad del consumidor, así como de la estrategia de los grandes operadores comerciales en destino. El aguacate, en cambio, se comercializa en gran medida en el mercado local, protegido de competencia foránea; pero el crecimiento de volúmenes de los últimos años hace pensar en el peso creciente de la exportación en el futuro inmediato. Por supuesto, esta separación según destinos es una simplificación de la variedad de canales de comercialización que puede utilizar un productor para hacer llegar su producto al consumidor final. En tal sentido, optar por la comercialización directa, o bien, hacerlo a través de un mercado mayorista o una cadena de supermercados, puede traducirse en diferencias relevantes de cotización media a lo largo del año.

En definitiva, existen muchos aspectos que pueden generar una importante variabilidad en los márgenes de rentabilidad entre explotaciones dedicadas al mismo cultivo, pero, con todo, los resultados obtenidos parecen consistentes con las tendencias observadas. La producción platanera perdería su rentabilidad si no existieran las ayudas públicas, de modo que el sistema de ayudas que explica la supervivencia del cultivo también impone lí-

mites a su crecimiento. En cambio, el cultivo de aguacate, menos dependiente de las ayudas públicas, mantiene márgenes de rentabilidad que justifican el crecimiento de las superficies destinadas a este cultivo por debajo de 600 m sobre el nivel del mar. Por supuesto, al margen de la capacidad de los productores canarios de plátano para hacer frente a una competencia creciente de los productores de banana en el mercado peninsular, la supervivencia futura del cultivo estará supeditada al resultado incierto de las negociaciones periódicas entre las autoridades regionales y las comunitarias. Las restricciones presupuestarias y el contexto político hacen presagiar dificultades. En cuanto al aguacate, el mercado canario está protegido para el mercado local, pero el crecimiento de superficie y producción sólo encontrará precios remuneradores si los productores canarios orientan una parte creciente de su producción a mercados exteriores. La asociación para la comercialización de los propios productores de aguacate y también con productores de otros frutos tropicales parece apuntar en esta dirección.

Declaración de contribución de autoría

- José Juan Cáceres-Hernández: conceptualización, análisis formal, metodología, redacción del borrador original, revisión y edición del texto final.
- Gloria Martín-Rodríguez: conceptualización, análisis formal, metodología, redacción del borrador original, revisión y edición del texto final.
- Dirk Godenau: conceptualización, metodología, redacción del borrador original, revisión y edición del texto final.
- José Ignacio González-Gómez: conceptualización, curación de datos, análisis formal, redacción del borrador original, revisión y edición del texto final.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el ámbito del proyecto de investigación Transferencia de I+D+i para el desarrollo sostenible de frutales tropicales en la Macaronesia (FRUTTMAC), MAC2/1.1b/310 subvencionado con fondos de la Unión Europea. Deseamos también agradecer el asesoramiento técnico prestado por el ingeniero agrónomo Luis González de Chaves.

Referencias bibliográficas

- Araújo J.B.C.N., Souza A.N., Joaquim M.S., Mattos L.M., Lustosa Junior I.M. (2020). Use of the activity-based costing methodology (ABC) in the cost analysis of successional agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 94: 71-80. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00368-6>
- Brito I.C.G., Figueiredo-Neto A., Farias M.S.R. (2020). Cost of production and economic performance of pacovan banana in the irrigated perimeter of Ponto Novo. *Custos e Agronegocio on line* 16: 207-232.
- Cáceres-Hernández J.J., González-Gómez J.I., Nuez-Yáñez J.S., Ramos-Henríquez J.M. (2010). Impacto de la reforma del Régimen Especial de la Seguridad Social Agraria en la agricultura canaria. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 10(2): 183-196. <https://doi.org/10.7201/earn.2010.02.09>
- Cáceres-Hernández J.J., González-Gómez J.I., Martín-Rodríguez G., Morini-Marrero S., Nuez Yáñez J.S., Pérez-Moriana E.D., Ramos-Henríquez J.M. (2012). Análisis de costes, precios y competitividad en la agricultura canaria de exportación. Memoria científica del Proyecto de Investigación PI2008/126. Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información del Gobierno de Canarias.
- Cáceres-Hernández J.J., Godenau D., González-Gómez J.I., Martín-Rodríguez G., Ramos-Henríquez J.M. (2018). Tomate canario de exportación: una evaluación de costes. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 114(3): 280-302. <https://doi.org/10.12706/itea.2018.017>
- Cáceres-Hernández J.J., Martín-Rodríguez G. (2017). Evolving splines and seasonal unit roots in weekly agricultural prices. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 61(2): 304-323. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12205>
- CapGemini (2009). Estudio de la cadena de valor y formación de precios del plátano. Observatorio de Precios de los Alimentos. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España. 57 pp.
- Carrillo A. (2021). Costos de producción 2019-2020/Aguacate. *Panorama Agropecuario (revista de Agricultura)*, 1-6.
- Castro L.M., Calvas B., Knoke T. (2015). Ecuadorian banana farms should consider organic banana with low price risks in their land-use portfolios. *PLoS ONE* 10(3): e0120384. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120384>
- Cedeño García G., Guzmán Cedeño A., Zambrano Lucero H., Vera Macías L., Valdivieso López C., López Alava G. (2020). Efecto de la densidad de siembra y riego complementario en la morfofenología, rendimiento, rentabilidad y eficiencia de la fertilización del plátano. *Scientia Agropecuaria* 11(4): 483-492. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.03>
- Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca (2022). Aguacate. Aproximación a los costes de producción. Servicio de Estadística. Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca del Gobierno de Canarias. 1 pp.
- Flores Rondón G.L, Guillén Vidal L.A. (2020). Análisis de competitividad para cultivo de palta peruana. Periodo 2000 a 2017. *Anales Científicos* 81(1): 58-70. <https://doi.org/10.21704/ac.v81i1.1554>
- Franco Sánchez M.A., Leos Rodríguez J.A., Salas González J.M., Acosta Ramos M.A., García Munguía A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(2): 391-403. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1080>

- González-Gómez J.I., Morini-Marrero S. (2009). A model for cost calculation and management in a multiproduct agricultural framework. The case for ornamental plants. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7(1): 12-23. <https://doi.org/10.5424/sjar/2009071-394>
- Gosselin M. (2007). A review of Activity-Based Costing: technique, implementation, and consequences. En: *Handbook of Management Accounting Research, Volume 2, 1ª Ed.* (Eds. Chapman C.S., Hopwood A.G., Shields M.D.), pp. 641-671. Elsevier Science. [https://doi.org/10.1016/S1751-3243\(06\)02008-6](https://doi.org/10.1016/S1751-3243(06)02008-6)
- Gutiérrez Mejía D.P., Nauzan Ceballos V.H., Díaz, G.A. (2017). Los salarios de eficiencia en el sector bananero de Urabá, Colombia. *Revista de Economía del Caribe* 20: 7-26. <http://dx.doi.org/10.14482/ecoca.20.8458>
- Junta de Andalucía. (2024). Datos básicos. Aguacate. 2023/24. Observatorio de Precios y Mercados de la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. 11 pp.
- Junta de Andalucía. (2025). Costes de cultivo de subtropicales en Andalucía. Campaña 2022/23. Servicio de Estudios y Estadísticas de la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. 24 pp.
- Kabinlapat P., Sutthachai S. (2017). An application of activity-based costing in the chicken processing industry: a case of joint products. *International Food and Agribusiness Management Review* 20(1): 85-97. <https://doi.org/10.22434/IFAMR2016.0017>
- Lalangui Balcázar M., Gutiérrez Jaramillo D. (2018). Estimación de los costos de producción del banano. En: *Costos de producción: estimación y proyección de ingresos* (Lalangui Balcázar M., Eras Agila R.J., Burgos Burgos J. eds.), pp. 112-147. Ediciones UTMACH.
- Lee T.R., Kao J.S. (2001). Application of simulation technique to activity-based costing of agricultural systems: a case study. *Agricultural Systems* 67: 71-82. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(00\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00042-1)
- Martins A.N., Furlaneto F.P.B., Silvestre Dias N.M., Suguino E. (2010). Economic study of fertirrigation system in banana crop (*Musa sp.*), 'Willians' cultivar. *Revista Brasileira de Fruticultura* 32(4): 1072-1081. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452010000400016>
- Meya A.I., Swennen R., Ndakidemi P.A., Mtei K.M., Mercks R. (2023). Better nitrogen fertilizer management improved Mchare banana productivity and profitability in Northern Highlands, Tanzania. *Agronomy* 13(5): 1418. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051418>
- Raineri C., Stivari T.S.S., Gameiro A.H. (2015). Lamb production costs: analyses of composition and elasticities analysis of lamb production costs. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 28(8): 1209-1215. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0585>
- Rodríguez Sosa L., Cáceres-Hernández J.J. (2014). Rentabilidad del cultivo de aguacate en Canarias. Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Rural del Cabildo de Tenerife. 69 pp.
- Stasova L.H. (2020). Statistical analysis of suitability of the activity based costing method in agricultural enterprises. *Agricultural and Resource Economics* 6(4): 20-42. <https://doi.org/10.51599/are.2020.06.04.02>
- Turco P.H.N., Martins A.N., Firetti R., Pinatti E., Araújo H.S. (2022). Estimate of production costs and profitability of banana cultivars. *Custos e Agronegócio on line* 18: 271-288.
- Vásquez-Aguilar R.F., García-Hevia S. (2021). Technical-economic study in avocado cultivation, Atahualpa Canton, El Oro province. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 30(3): 91-101.
- (Aceptado para publicación el 29 de octubre de 2025)

La dimensión económica de la sostenibilidad: Evaluación del impacto de los estándares de sostenibilidad en pequeños productores de banano en Colombia

Julieth Lizcano-Prada¹, Francisco J. Mesías^{2,*} y Marcela Maestre-Matos¹

¹ Facultad de Ciencias Empresariales y Económicas, Universidad del Magdalena, Calle 29H3 n22-02, 470004, Santa Marta, Colombia.

² Instituto Universitario de Investigación en Recursos Agrarios (INURA), Universidad de Extremadura, Avda. Adolfo Suárez, s/n, 06007 Badajoz, España.

Resumen

Los estándares de sostenibilidad (SS) han surgido como respuesta a los cambios en el comportamiento del consumidor sostenible, afectando la producción y distribución de productos agroalimentarios. Este estudio evalúa cómo los SS influyen en la dimensión económica de la sostenibilidad entre pequeños productores de banano en Colombia. El estudio está basado en una encuesta realizada a una muestra representativa de 99 pequeños bananeros asociados a seis cooperativas, utilizando el Modelo de Ecuaciones Estructurales para examinar cómo los criterios de los SS contribuyen a la dimensión económica de la sostenibilidad, utilizando como estudio de caso las agroempresas bananeras del Magdalena (Colombia).

Los resultados revelan una correlación fuerte y significativa entre los criterios de SS y la dimensión económica de la sostenibilidad, siendo las condiciones del mercado el factor más influyente en este contexto. Por su parte, las alianzas empresariales ejercen efectos moderados, mientras que el desarrollo local no muestra un impacto apreciable. Los SS tienen el potencial de mejorar el acceso al mercado, la inclusión financiera y la resiliencia de los pequeños agricultores; sin embargo, su éxito depende de intervenciones específicas y alianzas sólidas dentro de las cadenas de valor agroalimentarias.

Los resultados de este artículo pueden contribuir al desarrollo de estrategias que mejoren el desempeño en sostenibilidad de los pequeños productores y promuevan su crecimiento sostenible. Las investigaciones futuras deberían adoptar enfoques longitudinales y explorar las dimensiones económicas y ambientales interconectadas de la sostenibilidad para obtener una comprensión más completa del impacto de los SS en la agricultura.

Palabras clave: Sostenibilidad económica, agroempresa, ecuaciones estructurales, cooperativas agrícolas, resiliencia productiva, acceso al mercado.

* Autor para correspondencia: fjmesias@unex.es

Cita del artículo: Lizcano-Prada J., Mesías F.J., Maestre-Matos M. (2025). La dimensión económica de la sostenibilidad: Evaluación del impacto de los estándares de sostenibilidad en pequeños productores de banano en Colombia. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 121(4): 402-419. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.015>



The economic dimension of sustainability: Evaluation of the impact of sustainability standards on small banana producers in Colombia

Abstract

Sustainability standards (SS) have emerged as a response to changes in sustainable consumer behaviour, affecting the production and distribution of agrifood products. This study evaluates how SS influence the economic dimension of sustainability among small banana producers in Colombia. The study is based on a survey of a representative sample of 99 small banana farmers associated with six cooperatives and using Structural Equation Modelling to examine how SS criteria contribute to the economic dimension of sustainability, using as a case study the banana agribusinesses of Magdalena (Colombia). The results reveal a strong and significant correlation between the SS criteria and the economic dimension of sustainability, with market conditions being the most influential factor in this context. Business alliances have a moderate effect, while local development does not show measurable impact. SS have the potential to improve market access, financial inclusion and smallholder resilience; however, their success depends on targeted interventions and strong partnerships within agrifood value chains.

Findings from this paper can contribute to the development of strategies that improve smallholders' sustainability performance and promote their sustainable growth. Future research should adopt longitudinal approaches and explore the interconnected economic and environmental dimensions of sustainability to gain a more complete understanding of the impact of SSs in agriculture.

Keywords: Economic sustainability, agribusiness, structural equations, agricultural cooperatives, productive resilience, market access.

Introducción

La sostenibilidad ha evolucionado como un concepto integrador que abarca las dimensiones económica, social y ambiental. Esta visión holística, formulada inicialmente por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987), busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. En los sistemas agroalimentarios, este enfoque cobra especial relevancia debido al impacto significativo de la agricultura sobre los recursos naturales, la economía rural y la cohesión social (Voora *et al.*, 2022).

En este contexto, la certificación en estándares de sostenibilidad (SS) se ha consolidado como una práctica clave que evidencia el compromiso de las agroempresas con la gestión responsable. Dichos estándares constituyen un conjunto de códigos, protocolos o lineamientos que permiten evaluar las prácticas sostenibles a lo largo de la cadena glo-

bal de valor. En el caso de los agronegocios, integran criterios económicos, sociales y ambientales, además de los tradicionales aspectos de seguridad y calidad alimentaria (IISD, 2024). En la práctica, los SS se materializan a través de certificaciones, sellos o códigos de conducta –como FairTrade, Rainforest Alliance o Global G.A.P.– que los productores y empresas deben cumplir para demostrar que sus procesos se desarrollan bajo parámetros sostenibles. Estas certificaciones han emergido como herramientas esenciales para orientar a las agroempresas hacia prácticas más responsables, al tiempo que fortalecen su desempeño económico y su capacidad de adaptación a los mercados internacionales (Khan *et al.*, 2024).

La agricultura sostenible, en particular, representa una oportunidad para equilibrar la productividad con la responsabilidad ambiental y social. Sehgal y Batool (2024) destacan que este enfoque promueve la eficiencia en el uso de los recursos, reduce la depen-

dencia de insumos químicos y contribuye al fortalecimiento de los medios de vida en los países en desarrollo. Sin embargo, el acceso limitado al financiamiento y la ineficiencia en la gestión de recursos persisten como obstáculos estructurales que dificultan su implementación (Khan *et al.*, 2024). Estos desafíos evidencian la necesidad de enfoques integrales que articulen la innovación, las políticas públicas y la participación comunitaria, con el fin de consolidar la sostenibilidad económica del sector agrícola.

Dentro de este marco, los pequeños productores enfrentan retos específicos. Su sostenibilidad económica depende de la capacidad para generar ingresos estables, ofrecer condiciones laborales justas y reinvertir en tecnología. No obstante, factores estructurales como las dificultades de acceso al crédito y la intermediación excesiva afectan su rentabilidad. En este sentido, los SS pueden actuar como catalizadores al facilitar el acceso a mercados diferenciados, optimizar los recursos disponibles y mejorar la competitividad de los pequeños productores (Kryszak *et al.*, 2023).

Colombia se ha posicionado como el quinto mayor proveedor mundial de banano, representando el 10 % de las exportaciones globales en 2024, con una participación destacada de la región del Magdalena (FAO, 2025). Esta zona exporta principalmente hacia Estados Unidos y Europa, con énfasis en el Reino Unido, Bélgica y los Países Bajos (ASBAMA, 2025). En el Magdalena, predominan estructuras cooperativas en las que certificaciones como FairTrade, Rainforest Alliance y Global G.A.P. han facilitado el acceso a mercados internacionales más exigentes, promoviendo mejoras económicas y sociales entre los pequeños productores (Maestre-Matos *et al.*, 2023; AUGURA, 2024). En este contexto, los SS se configuran como una vía concreta para fortalecer la resiliencia económica, incrementar el valor agregado y fomentar la

inclusión productiva de los pequeños productores de banano.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de los SS sobre la dimensión económica de la sostenibilidad entre pequeños productores de banano en Colombia. El artículo se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta el marco teórico y conceptual, donde se formulan las hipótesis de investigación; posteriormente, se describe la metodología, los procedimientos de recolección y el análisis de los datos; a continuación, se exponen los resultados empíricos y se discuten a la luz de la literatura existente; finalmente, se presentan las conclusiones, en las que se sintetizan los principales hallazgos, se destacan las implicaciones prácticas, se reconocen las limitaciones del estudio y se proponen futuras líneas de investigación.

Marco teórico y conceptual

La dimensión económica de la sostenibilidad se refiere a la capacidad de generar valor mediante la producción eficiente de bienes y servicios, distribuyendo sus beneficios entre consumidores, empleados, accionistas y comunidades (Bansal, 2005). Está estrechamente vinculada con aspectos sociales, lo que ha dado origen al concepto de sostenibilidad socioeconómica (Gladwin *et al.*, 1995). Esta dimensión abarca elementos como eficiencia en beneficios, innovación comercial, gestión de riesgos, relaciones con proveedores, remuneración justa, acceso a crédito y seguros, y reducción de costos de insumos (Antolín-López *et al.*, 2016). Así, el desempeño económico sostenible no solo se mide por la rentabilidad, sino también por su capacidad para fortalecer el tejido social y productivo de los territorios donde operan las organizaciones, especialmente en sectores como el agrícola, donde las comunidades dependen directamente del ingreso generado por la producción.

SS y dimensión económica de la sostenibilidad en los pequeños productores de banano

Los SS son herramientas fundamentales de regulación no estatal en cadenas agroalimentarias como la del banano, donde su adopción responde tanto a la debilidad de marcos regulatorios nacionales como a las crecientes exigencias del comercio internacional por prácticas responsables (Voora et al., 2022). De naturaleza predominantemente privada, estos estándares establecen criterios sociales, ambientales y económicos cuya verificación mediante auditorías o certificaciones se convierte en un requisito implícito de mercado. Entre los más relevantes, Fair Trade promueve precios mínimos y desarrollo comunitario para pequeños productores, mientras que Rainforest Alliance incluye criterios de conservación y respeto a las comunidades locales (Sama et al., 2018; IISD, 2024). Más allá de su función técnica, los SS permiten diferenciar productos, fortalecer la legitimidad empresarial y aumentar la resiliencia de los pequeños productores ante los desafíos estructurales del sector (Lizcano-Prada et al., 2018). Al hacer la revisión de los SS se determinaron algunas variables que permiten medir la dimensión económica de la sostenibilidad en pequeños productores, tal como se explica a continuación:

Acceso Financiero

El acceso a crédito es un factor crítico para lograr sostenibilidad económica. Sin embargo, los pequeños productores enfrentan barreras estructurales que limitan su capacidad de inversión en tecnología, infraestructura y mejoras productivas. Khan et al. (2024) señalan que estas limitaciones frenan la eficiencia productiva y afectan la competitividad. Los SS pueden actuar como catalizadores al facilitar

financiamiento a través de alianzas con bancos, cooperativas y organizaciones no gubernamentales.

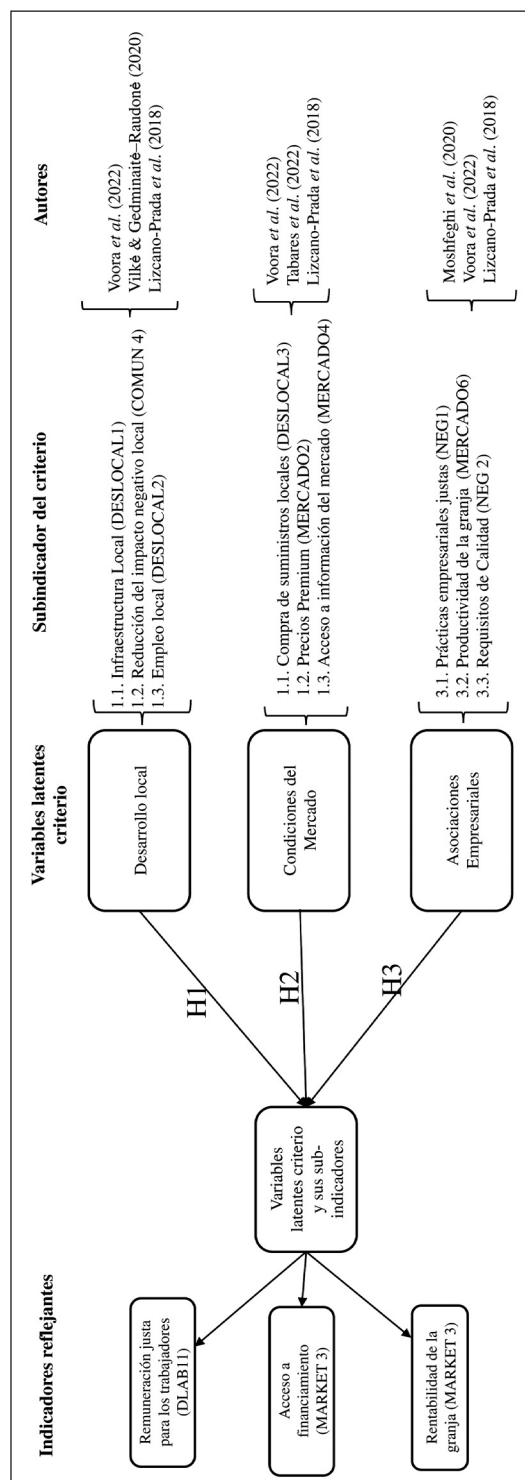
Salarios/Remuneración

Uno de los pilares de la sostenibilidad económica es la capacidad de los productores para ofrecer salarios justos y condiciones laborales dignas. Los SS, especialmente los de tipo social, exigen el cumplimiento de estándares laborales que benefician tanto a trabajadores como a comunidades. Estas certificaciones no solo impactan la reputación empresarial, sino que también reducen la rotación laboral y fomentan la cohesión social en zonas rurales (Tabares et al., 2022).

Rentabilidad de la finca

La rentabilidad es esencial para que los pequeños productores puedan sostenerse y crecer. Indicadores como la Productividad Total de los Factores (PTF), el ingreso neto agrícola y la relación costo-beneficio son fundamentales para evaluar la viabilidad económica (Kryszak et al., 2023). El uso eficiente de recursos como agua, energía y tierra contribuye a reducir costos y maximizar el rendimiento. Los SS, al promover buenas prácticas agrícolas, fortalecen la rentabilidad a largo plazo y permiten a los productores responder con mayor eficacia a la volatilidad del mercado (Voora et al., 2022).

Basado en lo anterior, este estudio integra criterios de la literatura e indicadores de los SS tal como se muestra en la Figura 1, que están enmarcados a partir del análisis realizado por Lizcano-Prada et al. (2018) con la revisión de los SS en la agroindustria, definiéndolos como códigos, protocolos y directrices diseñados para evaluar las prácticas de sostenibilidad a lo largo de la cadena de valor.



Fuente: Elaboración propia de los autores.

Figura 1. Criterios de la dimensión económica identificados en los SS.

Figure 1. Criteria of economic dimension identified in the Sustainability Standards.

Hipótesis de investigación

Cada vez se espera más que las agroempresas aborden preocupaciones sociales que afectan a consumidores, empleados, inversionistas y comunidades locales (Kurth et al., 2021). Estos esfuerzos incluyen iniciativas como el desarrollo local, el apoyo comunitario, la filantropía, la responsabilidad sobre los productos y la promoción del consumo sostenible (Vilké y Gedminaitė-Raudonė, 2020), lo que da lugar a la Hipótesis 1 (H1).

- H1: El desarrollo local fomenta la dimensión económica de la sostenibilidad

También implica condiciones de mercado como los precios, la rentabilidad, el financiamiento y el acceso a la información, junto con prácticas empresariales éticas como las regulaciones antidumping, el respeto a los derechos de propiedad y la calidad del producto (Hipótesis 2 y 3) (Moshfeghi et al., 2020; Tabares et al., 2022).

- H2: Las condiciones de mercado fortalecen la dimensión económica de la sostenibilidad
- H3: Las alianzas empresariales aseguran la dimensión económica de la sostenibilidad

En resumen, la dimensión económica de la sostenibilidad en el contexto de las agroempresas va más allá de las prácticas comerciales convencionales, e involucra a los actores locales bajo un modelo ascendente de desarrollo local, condiciones de mercado y alianzas empresariales (Bemelmans et al., 2023).

Material y métodos

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo para evaluar variables de sostenibilidad dentro de la dimensión económica, enfocándose en cooperativas bananeras colombianas ubicadas en la región del Magdalena (Colombia). En el Magdalena, las cooperativas

de pequeños productores cumplen un rol clave en la cadena de valor del banano de exportación. Las comercializadoras internacionales negocian directamente con estas organizaciones –y no con productores individuales– para garantizar la calidad del producto y precios que aseguren rentabilidad. Actualmente existen seis cooperativas activas en esta región que agrupan a 335 pequeños productores certificados mayoritariamente bajo estándares como Global G.A.P., Rainforest Alliance y Fair Trade (Maestre-Matos et al., 2019). Estos productores son propietarios de 451 predios de pequeña escala (predios de 1 a 10 ha) (ASBAMA, 2025).

Con un enfoque descriptivo, el estudio ofrece una visión detallada de las variables examinadas, empleando un diseño transversal que captura una instantánea temporal mediante la aplicación de instrumentos cuantitativos en un solo momento. Este enfoque permite la recolección y el análisis de datos sobre variables de sostenibilidad, brindando información valiosa sobre la dimensión económica.

Recolección de datos

Los datos analizados en esta investigación fueron recolectados a través de una encuesta aplicada en Colombia entre enero y marzo de 2023. La población objetivo estuvo conformada por pequeños productores de banano asociados a cooperativas de la Región del Magdalena (Colombia). El estudio contó con la autorización del Comité de Bioética de la Universidad del Magdalena (registro N.º 002/2023). Todos los participantes brindaron su consentimiento informado, garantizando que sus respuestas permanecerían confidenciales y anónimas. No se ofreció ninguna compensación a cambio de la participación.

El cuestionario pedía a los encuestados que indicaran en una escala Likert de 1 a 5 si los SS ayudaban a la consecución de distintos indicadores presentados y relacionados con

la dimensión económica de la sostenibilidad. Dicho instrumento fue validado previamente por expertos en sostenibilidad y sometido a pruebas de interpretación con diez (10) pequeños productores en noviembre de 2022, con el fin de ajustar la redacción y el nivel de complejidad de las preguntas.

La Tabla 1 presenta los ítems evaluados en esta investigación, junto con su respectiva nomenclatura para la identificación en las tablas y figuras posteriores.

Muestra

Dado el tamaño y las características de la población –de la cual el 97 % cuenta con certificaciones en Global G.A.P. y Fair Trade– se estableció un error de muestreo inicial del 10 % para un intervalo de confianza del 95 % ($k = 2$) y proporciones medias. Finalmente, el número de cuestionarios válidos fue de 99, lo que supone un error final del 8,4 % y que se considera adecuado para este tipo de estudio. Con el propósito de garantizar la representatividad del sector bananero en el Magdalena, la distribución de los encuestados entre las cooperativas se realizó mediante muestreo estratificado, bajo el criterio de inclusión de “pequeño productor asociado con certificación internacional en Global G.A.P. y Fair Trade”. La asignación de participantes se efectuó de manera proporcional a la representatividad de cada cooperativa, y dentro de ellas, la selección de productores se llevó a cabo de forma aleatoria.

Análisis de Datos

Previo a la validación de las hipótesis, se efectuó un análisis descriptivo de los indicadores, con el propósito de facilitar la interpretación del modelo matemático. Para evaluar las hipótesis planteadas, se utilizó el modelado de ecuaciones estructurales mediante mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM), emple-

Tabla 1. Indicadores relacionados con la dimensión económica de la sostenibilidad e incluidos en el estudio.
 Table 1. Indicators related to the economic dimension of sustainability and included in the study.

Categoría	Indicador	Indique si los SS contribuyen a los siguientes objetivos (1: totalmente en desacuerdo a 5: totalmente de acuerdo)
1. Desarrollo Local	DESLOCAL1	1.1. Contribución a la mejora de infraestructuras básicas locales
	COMUN4	1.2. Reducción de impactos negativos a la comunidad
	DESLOCAL2	1.3. Oportunidades de empleo y contratación local.
2. Condiciones de Mercado	DESLOCAL3	2.1. Compra de insumos a proveedores locales
	MERCADO2	2.2. Precios Premium por producción
	MERCADO4	2.3. Acceso a Información de mercado
3. Asociaciones Empresariales	NEG1	3.1. Prácticas de negocio justas (anti-corrupción y anti-dumping)
	MERCADO6	3.2. Estrategias para mejorar la productividad de la explotación
	NEG2	3.3. Requisitos de calidad del producto
4. Dimensión Económica	DLAB1	4.1. Remuneración justa a los trabajadores
	MERCADO3	4.2. Acceso a financiamiento
	MERCADO5	4.3. Rentabilidad de la explotación

Tabla 2. Distribución de la muestra entre las cooperativas de pequeños productores de banano en Magdalena, Colombia.

Table 2. Sample distribution among small banana producers' cooperatives in Magdalena, Colombia.

Cooperativa	Asociados	Peso Porcentual (%)	Asociados Encuestados
ASOBANARCOOP	31	9	10
BANAFRUCOOP	36	11	12
COOBAFRIO	53	16	16
COOBAMAG	62	19	19
COOMULBANANO	78	23	22
EMPREBANCOOP	75	22	20
Total	335	100	99

Fuente: Elaboración propia de los autores.

ando el software SMART PLS. Este enfoque analítico es ampliamente utilizado en las ciencias sociales y del comportamiento, ya que permite la representación, estimación y análisis de redes teóricas de relaciones lineales entre variables observables y latentes (Hair et al., 2006; Maestre-Matos et al., 2023). Existen dos variantes principales de SEM: el método basado en covarianzas (CB-SEM) y el método basado en varianza (PLS-SEM). Mientras que el CB-SEM se centra en la explicación, el PLS-SEM es adecuado tanto para la predicción como para la explicación (Dash y Paul, 2021). En estudios recientes similares, se destaca al PLS-SEM por su flexibilidad para explicar fenómenos sociales complejos con tamaños de muestra limitados (Lizcano-Prada et al., 2024). En consecuencia, se seleccionó el PLS-SEM para este estudio.

Esta investigación incorpora la dimensión económica, uno de los componentes de la Triple Cuenta de Resultados (*Triple Bottom Line*) de Elkington (1999) sobre la Sostenibilidad, abordando los intereses de los distintos stakeholders (Freeman, 2010; Antolín-López et al., 2016). Las variables latentes (Figura 1) que miden la dimensión económica derivan de una revisión exhaustiva de los criterios presentes en 17 SS para el comercio internacional de banano (Lizcano-Prada et al., 2018). Como se observa en el modelo (Figura 1), estos estándares, influenciados por las presiones del mercado y la teoría institucional, moldean las acciones en las cooperativas. Las variables definidas son examinadas en la literatura, formando hipótesis fundamentales en el modelo de investigación y evaluando su impacto positivo o negativo sobre la dimensión económica. Los indicadores de medición (Tabla 1) derivan del análisis de criterios comunes en la dimensión económica de los estándares. Cada criterio corresponde a una variable latente, la cual está asociada a su vez con subcriterios que funcionan como indicadores de cumplimiento adoptados por los productores de banano en cooperativas (Figura 1).

El estudio aborda la limitación del PLS-SEM en la medición directa de variables latentes (Williams et al., 2010). Para superar esto, los investigadores utilizaron un cuestionario para evaluar las percepciones sobre el cumplimiento de la dimensión económica en las cooperativas. Estas percepciones están influenciadas por presiones ambientales incorporadas dentro de los criterios de los estándares de certificación, los cuales se tratan como variables latentes. La evaluación se basa en los indicadores presentados en la Figura 1. Los encuestados calificaron su percepción de cumplimiento utilizando una escala de Likert (5: cumplimiento total; 1: incumplimiento). El cuestionario fue validado por expertos en sostenibilidad y se realizaron pruebas de interpretación con pequeños productores para afinar la complejidad y redacción de los ítems.

De acuerdo con lo indicado por Lizcano-Prada et al. (2024) el análisis de datos se llevó a cabo en tres etapas (Tabla 3).

Resultados

Siguiendo la metodología planteada, los resultados descriptivos se presentan en la Tabla 4, donde se observa que todos los indicadores alcanzan una media superior a 4,58; siendo los valores más altos NEG1, NEG2 y DLAB1. En cuanto a la respuesta de percepción por indicador se tiene que el valor mínimo reportado varía entre los indicadores: algunos como DESLOCAL1, DESLOCAL3 y MERCADO5, presentan un rango de 1 a 5; otros, como MERCADO6, NEG1 y NEG2, fluctúan entre 3 y 5; mientras que el resto oscila entre 2 y 5.

Asimismo, se evidencia que la desviación estándar es moderada en la mayoría de los indicadores, lo que refleja una dispersión relativamente baja de los datos y, por ende, una consistencia en las percepciones de los encuestados.

Tabla 3. Evaluación del modelo PLS-SEM.
 Table 3. Assessment of the PLS-SEM model.

Etapas	Evaluación	Criterios	Autores
1. Modelo Global	Raíz cuadrada media residual estandarizada (SRMR)	SRMR < 0,1	Hu y Bentler (1998) Henseler (2017) Ringle et al. (2009)
2. Modelo de medición			
2.1 Validez convergente	Confiabilidad de consistencia interna	Alfa de Cronbach > 0,5 Fiabilidad compuesta > 0,7	Nunnally (1994) Werts et al. (2017) Dijkstra y Henseler (2015)
	Validez convergente	Varianza media extraída > 0,5	Fornell y Larcker (1981) Afthanorhan (2013)
	Fiabilidad del indicador	Carga externa estandarizada > 0,5	Afthanorhan (2013)
2.2 Validez discriminante	Heterotrait-Monotrait (HTMT)	HTMT < 0,9	Henseler et al. (2015)
3. Modelo estructural	Coefficientes de trayectoria	Evaluación del signo algebraico, magnitud y significancia estadística de los coeficientes de trayectoria	
	R-cuadrado	0 < R2 < 1	
	f-cuadrado	Mide la varianza de un constructo explicada por sus variables predictoras	Falk y Miller (1992) Chin (1998)
		Mientras mayor el valor de f ² , mayor el efecto entre los constructos	

Tabla 4. Análisis descriptivo de los indicadores.

Table 4. Descriptive analysis of the indicators.

Indicador	Media	Valor mínimo Observado	Valor máximo Observado	Desviación estándar
COMUN4	4,667	2	5	0,627
DESLOCAL1	4,562	1	5	0,809
DESLOCAL2	4,495	2	5	0,806
DESLOCAL3	4,552	1	5	0,73
MERCADO2	4,581	2	5	0,727
MERCADO4	4,59	2	5	0,686
MERCADO6	4,619	3	5	0,623
NEG1	4,724	3	5	0,525
NEG2	4,725	3	5	0,526
DLAB1	4,733	2	5	0,539
MERCADO3	4,667	2	5	0,612
MERCADO5	4,589	1	5	0,726

Posteriormente se evaluaron los siguientes componentes del modelo PLS-SEM: el modelo global, el modelo de medición y el modelo estructural (Tabla 5).

Evaluación del Modelo Global

Se utilizó el indicador SRMR, que establece un umbral de 0,10 para considerar un buen ajuste en los estudios. En este estudio, el valor SRMR alcanzó 0,09; cumpliendo así con el estándar requerido.

Evaluación del Modelo de Medición

En cuanto a la confiabilidad de consistencia interna, los valores obtenidos oscilan entre 0,701 para el alfa de Cronbach de la variable Condiciones del Mercado y 0,845 para la Dimensión Económica-Sostenibilidad Corporativa. En relación con los indicadores rho_c y

rho_a, los valores más altos se generan en la Dimensión Económica-Sostenibilidad Corporativa (0,908 y 0,86; respectivamente), mientras que los más bajos se observan en Condiciones del Mercado (0,705 y 0,708). Esto indica que todos los indicadores cumplen con los criterios establecidos (Tabla 5).

La validez convergente refleja la capacidad de los indicadores para explicar sus variables latentes. En este estudio, los valores obtenidos van desde 0,652 para la variable Condiciones del Mercado hasta 0,768 para la Dimensión Económica-Sostenibilidad Corporativa (Tabla 5), cumpliendo así con el estándar requerido.

El indicador de confiabilidad se evalúa a través de la carga externa estandarizada, también conocida como carga factorial (λ), que representa el coeficiente de correlación entre la variable latente y sus indicadores. En este estudio, los resultados (Tabla 5) muestran que el valor más bajo corresponde al indica-

Tabla 5. Evaluación del Modelo de Medición.
 Table 5. Assessment of the measurement model.

Variables	Indicador	Carga Factorial	Alfa de Cronbach	Fiabilidad Compuesta (rho_a)	Fiabilidad Compuesta (rho_c)	Varianza Promedio Extraída (AVE)
Desarrollo Local	COMUN4	0,791	0,760	0,769	0,861	0,675
	DESLOCAL1	0,775				
	DESLOCAL2	0,894				
Condiciones del Mercado	DESLOCAL3	0,701	0,701	0,708	0,705	0,652
	MERCADO2	0,762				
	MERCADO4	0,787				
Asociaciones Empresariales	MERCADO6	0,884	0,745	0,785	0,853	0,660
	NEG1	0,756				
	NEG2	0,918				
Dimensión Económica-Sostenibilidad	DLAB1	0,944	0,845	0,868	0,908	0,768
	MERCADO3	0,823				
	MERCADO5	0,707				

por DESLOCAL3 con 0,701 para Condiciones del Mercado, mientras que el valor más alto es de 0,944 para el indicador DLAB1 en la Dimensión Económica-Sostenibilidad.

En resumen, con base en la evaluación de la validez convergente presentada y detallada en la

Tabla 5, el modelo de medición cumple con todos los requisitos establecidos para su validez.

Con respecto a la validez discriminante el método HTMT proporcionó un valor por debajo de 0,9 (Tabla 6), por lo que se determina que el modelo presenta validez discriminante.

Tabla 6. Validez discriminante del modelo de medición.
 Table 6. Discriminant validity of the measurement model.

Variables	Valor
Desarrollo Local → Asociaciones Empresariales	0,823
Desarrollo Local → Dimensión Económica-Sostenibilidad	0,853
Condiciones del Mercado → Desarrollo Local	0,882
Condiciones del Mercado → Asociaciones Empresariales	0,888
Condiciones del Mercado → Dimensión Económica-Sostenibilidad	0,875
Asociaciones Empresariales → Dimensión Económica-Sostenibilidad	0,875

Evaluación del Modelo Estructural

Para evaluar el modelo estructural, se utilizó el método de bootstrapping con un intervalo de confianza del 90 % y 5,000 muestras, con el objetivo de analizar la correlación estadística entre las variables latentes. Al examinar los coeficientes de trayectoria, se observó que

sus valores fluctúan entre +1 y -1 (Tabla 7: Muestra Original (O)). Todas las hipótesis mantienen el mismo signo algebraico propuesto en el modelo teórico. Además, con un nivel de significancia de p -valor $< 0,01$, se confirma la aceptación de todas las hipótesis propuestas.

Tabla 7. Evaluación de las hipótesis de la Dimensión Económica de la Sostenibilidad.
Table 7. Evaluation of the hypotheses for the Economic Dimension of Sustainability.

Hipótesis	Muestra original (O)	Desviación estándar (STDEV)	Estadísticas t (O/STDEV)	P Valor
Dimensión Económica-Sostenibilidad → Asociaciones Empresariales	0,637	0,083	7,718	0,000
Dimensión Económica-Sostenibilidad → Desarrollo Local	0,546	0,090	6,092	0,000
Dimensión Económica-Sostenibilidad → Condiciones del Mercado	0,677	0,064	9,543	0,000

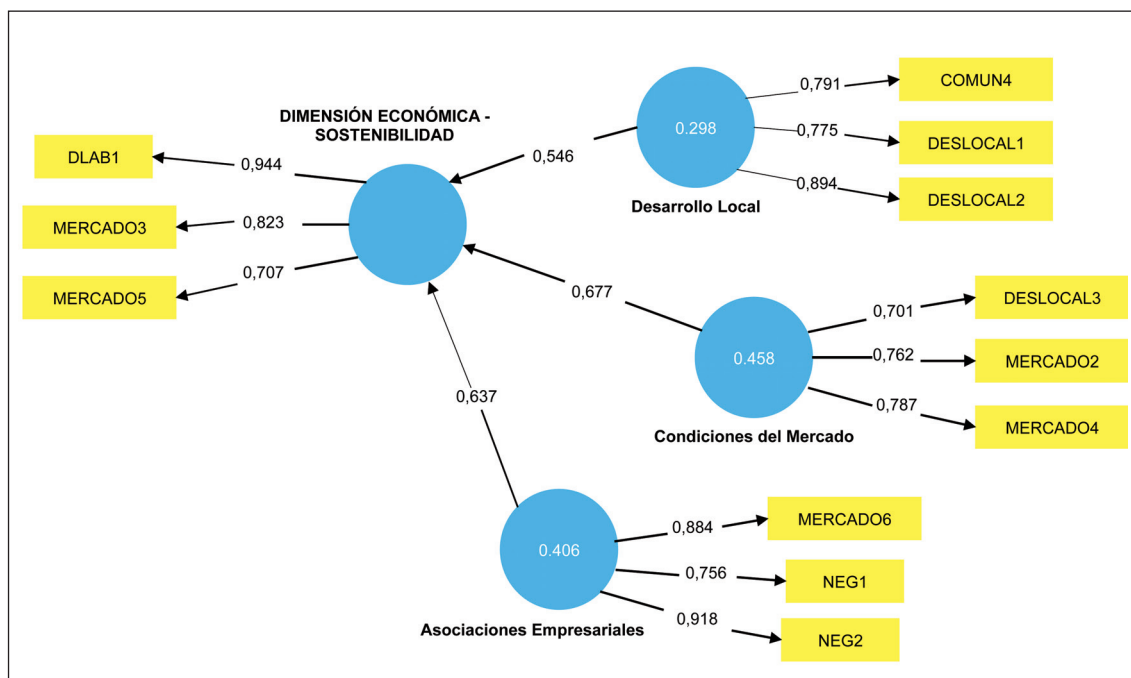
Los resultados explican que las Asociaciones Empresariales, el Desarrollo Local y las Condiciones del Mercado afectan la Dimensión Económica, lo que significa que todas las hipótesis son válidas. Según los coeficientes de los caminos, las Condiciones del Mercado (0,677) tienen la mayor influencia en la dimensión económica, mientras que la menos influyente es el Desarrollo Local (0,546).

El coeficiente de determinación (R^2) (Figura 2) se determinó dentro del rango de 0 a 1 y mide la varianza de un constructo explicada por sus variables predictoras. Cuanto mayor sea el valor de R^2 , mayor será el poder explicativo del modelo (Falk y Miller, 1992). El R^2 debe ser al menos $\geq 0,10$. En este estudio, el valor más bajo de R^2 corresponde al Desarrollo Local (0,298), mientras que el más alto se observa en Condiciones del Mercado (0,458), y las Alianzas Empresariales presentan un valor intermedio (0,406). Este resultado indica que todas las variables explican de manera moderada su influencia en la dimensión económica.

En cuanto a los efectos de las relaciones entre constructos, medidos a través de f^2 , se determinó que mientras mayor sea el valor de f^2 , mayor será el efecto entre constructos. Por lo tanto, el efecto más fuerte lo generan las Condiciones del Mercado ($f^2 = 0,845$), mientras que el efecto más débil proviene del Desarrollo Local ($f^2 = 0,424$). Las Alianzas Empresariales presentan un efecto intermedio ($f^2 = 0,682$).

Discusión

Esta investigación profundiza en la dimensión económica de la sostenibilidad en cooperativas de pequeños productores de banana en Colombia, alineándose con estudios que destacan el papel de los SS en las prácticas agrícolas responsables (Gebre *et al.*, 2020). En particular, se analizan cooperativas conformadas por productores certificados en Global G.A.P. y Fair Trade, quienes han integrado estos estándares como respuesta a



Fuente: Elaboración propia de los autores.

Notas: Los círculos representan variables latentes; los rectángulos son indicadores; los números ubicados entre las variables latentes y los indicadores son las cargas; los números entre las flechas que comunican variables latentes entre sí representan los efectos entre dichas variables (coeficientes de ruta). Los números dentro de los círculos son los coeficientes de determinación (R^2).

Figura 2. Modelo Estructural.

Figure 2. Structural model.

las exigencias del mercado, fortaleciendo así su legitimidad institucional (Lizcano-Prada et al., 2024). El elevado porcentaje de cooperativas certificadas (97 %) refleja la creciente demanda de los mercados internacionales por productos con atributos diferenciados de calidad, acordes con las preocupaciones sociales y ambientales de los consumidores (Mesías et al., 2021; Grymshi et al., 2022). Más allá del ámbito externo, los SS también generan beneficios internos, mejorando la remuneración y las condiciones laborales de los pequeños productores, lo que contribuye a su resiliencia frente a escenarios productivos o comerciales adversos (Lizcano-Prada et al., 2018; Maestre-Matos et al., 2019).

El análisis con PLS-SEM muestra que las Condiciones del Mercado emergen como el factor más influyente para garantizar la sostenibilidad económica, incluyendo variables como acceso a información, precios premium y compras locales. En este sentido, iniciativas orientadas a promover la integración cooperativa podrían ampliar las oportunidades de los pequeños productores para acceder a mejores herramientas de mercado –como información actualizada de precios e internacionalización– al tiempo que fortalecen la interrelación entre productores y agroindustria. Este hallazgo coincide con estudios que vinculan estas condiciones con mejoras en la productividad y la competitividad en el entor-

no rural (Hu y Zang, 2024). Asimismo, estos factores fortalecen vínculos sociales y económicos con las comunidades, contribuyendo al logro de los ODS 2 y 12 (Sehgal y Batool, 2024).

En contraste, el Desarrollo Local mostró menor influencia sobre la sostenibilidad económica. Aunque incluye variables relevantes como infraestructura y empleo, estas suelen depender de actores externos como gobiernos o aliados estratégicos (Barbosa, 2024). Este resultado evidencia la dificultad de las cooperativas para incidir directamente en factores de infraestructura –como las vías de transporte–, lo que plantea desafíos para la creación de valor territorial.

La certificación influye de forma significativa en Criterios Laborales, en especial el pago justo y las condiciones mínimas de trabajo, alineándose con estudios en la región que destacan el impacto del comercio justo en el bienestar de los trabajadores agrícolas (Maestre-Matos et al., 2023; Lizcano-Prada et al., 2024).

Además, se evidenció que el acceso al Financiamiento y la existencia de contratos estables son factores clave para mejorar la estabilidad económica de las cooperativas, promoviendo oportunidades empresariales (Maestre-Matos et al., 2023). No obstante, la Sostenibilidad Económica no se refleja directamente en mayores niveles de rentabilidad agrícola, en consonancia con estudios que cuestionan los beneficios económicos de los SS en pequeños productores (Snider et al., 2017). Estos hallazgos se vinculan con los ODS 2 (Hambre Cero) y ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), que enfatizan la importancia de una agricultura sostenible y un consumo responsable (Blagov y Petrova-Savchenko, 2020).

Aunque este estudio ofrece aplicaciones directas para el fortalecimiento de los pequeños productores de banano en Colombia y en contextos análogos, presenta algunas limitaciones. La primera se relaciona con el alcance de la muestra, dado que su tamaño y

localización geográfica restringen la generalización de los resultados a otros territorios o a productores no asociados en cooperativas. Además, la naturaleza transversal de la investigación impide observar la evolución en el tiempo, limitando la posibilidad de establecer relaciones causales más robustas entre la implementación de SS y los objetivos empresariales y sociales.

Como líneas de investigación futura, se plantea explorar las interacciones entre las dimensiones económica, ambiental y social de la sostenibilidad, identificando sinergias y tensiones entre ellas, así como examinar los efectos diferenciados de diversos tipos de alianzas empresariales y esquemas de certificación en el fortalecimiento de la resiliencia de los pequeños productores.

En conclusión, la adopción de estándares de sostenibilidad en la agroindustria resulta esencial para responder a las presiones de los grupos de interés, las demandas de los mercados internacionales y las exigencias de consumidores cada vez más orientados hacia una producción responsable. Este estudio identifica tres criterios fundamentales para fortalecer la dimensión económica de la sostenibilidad en cooperativas de pequeños productores de banano, aportando bases para la adaptación de prácticas agrícolas y la actualización de marcos regulatorios.

Las agroempresas en países en desarrollo que implementan SS no solo obtienen legitimidad local, sino que también acceden a mercados internacionales diferenciados. De cara a los responsables de política agraria, los resultados orientan hacia la necesidad de diseñar mecanismos que amplíen el acceso de los pequeños productores a mercados especializados y a servicios financieros inclusivos, al tiempo que fomenten alianzas estratégicas entre productores, comercializadores y distribuidores. Finalmente, se sugiere integrar los SS dentro de las políticas nacionales de desarrollo rural, re-

conociéndolos como instrumentos capaces de impulsar la equidad, la competitividad y la resiliencia del sector agroalimentario.

Conclusiones

Este estudio ofrece evidencia empírica sobre la influencia de los SS en la dimensión económica de la sostenibilidad entre pequeños productores de banano en el Magdalena, Colombia. A partir de un enfoque cuantitativo y el uso del modelo PLS-SEM, se identificaron factores clave que fortalecen la sostenibilidad económica: condiciones del mercado, alianzas empresariales y desarrollo local.

Las condiciones del mercado resultaron ser el factor más determinante, al resaltar la importancia del acceso a información comercial, precios preferenciales y recursos financieros. Asimismo, las alianzas empresariales juegan un rol crucial al facilitar prácticas comerciales justas, requisitos de calidad y mejoras en la productividad, tanto entre productores como con otros actores de la cadena de valor.

Aunque el desarrollo local tuvo un efecto más moderado, sigue siendo fundamental para el empleo rural y la infraestructura básica. En conjunto, los resultados muestran que los SS pueden mejorar la viabilidad económica de los pequeños productores cuando se articulan con políticas de apoyo, organización gremial y acceso al crédito.

Este trabajo contribuye al debate sobre sostenibilidad agrícola, especialmente en países en desarrollo, y destaca la necesidad de seguir investigando el impacto a largo plazo de los SS en diferentes contextos agroalimentarios. Asimismo, ofrece evidencia sobre la relación entre estándares voluntarios y desempeño económico, aportando recomendaciones relevantes para gestores de políticas públicas, cooperativas y actores de la cadena agroalimentaria. De esta forma, se busca contribuir

al diseño de estrategias que integren sostenibilidad, competitividad y justicia social en el agro colombiano.

Contribución de autoría

- Julieth Lizcano-Prada: investigación, análisis formal, redacción-borrador original.
- Francisco J. Mesías: conceptualización, metodología, análisis formal, redacción-revisión y edición.
- Marcela Maestre-Matos: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción-borrador original.

Referencias bibliográficas

- Afthanorhan W.M.A.W. (2013). A comparison of partial least square structural equation modeling (PLS-SEM) and covariance based structural equation modeling (CB-SEM) for confirmatory factor analysis. *International Journal of Engineering, Science and Innovation Technologies* 2(5): 198-205.
- Antolín-López R., Delgado-Ceballos J., Montiel, I. (2016) Deconstructing corporate sustainability: a comparison of different stakeholder metrics. *Journal of Cleaner Production* 136: 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.111>
- Asociación de Bananeros de Colombia (AUGURA). (2024). Coyuntura Económica 2023. Análisis del mercado del banano. Disponible en: <https://augura.com.co/wp-content/uploads/2024/04/Coyuntura-Bananera-2023.pdf> (Consultado: 15/01/ 2025)
- Asociación de Bananeros de Magdalena y La Guajira – ASBAMA. (2025). Bananómetro. Tendencias y oportunidades del sector bananero 2024. ASBAMA, Magdalena, Colombia. 21 pp.
- Bansal P. (2005). Evolving sustainably: A longitudinal study of corporate sustainable development. *Strategic Management Journal* 26(3): 197-218. <https://doi.org/10.1002/smj.441>

- Blagov Y.E., Petrova-Savchenko A.A. (2020). The transformation of corporate sustainability model in the context of achieving the UN SDGs: Evidence from the leading Russian companies. *Corporate Governance* 21(2): 307-321. <https://doi.org/10.1108/cg-01-2020-0047>
- Barbosa M.W. (2024). The effects of international orientation on the dimensions of the environmental performance of agri food companies: A Chilean perspective. *Agribusiness* 41: 992-1009. <https://doi.org/10.1002/agr.21993>
- Bemelmans J., Cruze D., Olper A., Maertens M. (2023). Trade effects of voluntary sustainability standards in tropical commodity sectors. *Food Policy* 118: 102440. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102440>
- Chin W.W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. En *Modern Methods for Business Research* (Ed. Marcoulides G.A.), pp. 295-336. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). Informe Brundtland: Nuestro futuro común. Asamblea General, 4 de agosto, Nueva York, Estados Unidos, pp. 416. https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf
- Dash G., Paul J. (2021). CB-SEM vs PLS-SEM methods for research in social sciences and technology forecasting. *Technological Forecasting and Social Change* 173: 121092. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121092>
- Dijkstra T.K., Henseler J. (2015). Consistent partial least squares path modeling. *MIS Quarterly* 39(2): 297-316. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2015/39.2.02>
- Elkington J. (1999). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. New Society Publishers, Michigan, EE.UU. 407 pp.
- Falk R.F., Miller N.B. (1992). *A primer for soft modeling*. University of Akron Press. Ohio, EE.UU. 103 pp.
- FAO. (2025). *Banana Market Review. Preliminary results 2024*. Rome. 18 pp. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3731en> (Consultado: 10/01/2025).
- Fornell C., Larcker D.F. (1981). Structural equation models with unobservable variables and measurement error: Algebra and statistics. *Journal of Marketing Research* 18: 382-388. <https://doi.org/10.2307/3150980>
- Freeman R.E. (2010). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Cambridge University Press, Cambridge. 276 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139192675>
- Gebre G.G., Rik E., Kijne A. (2020). Analysis of banana value chain in Ethiopia: Approaches to sustainable value chain development. *Cogent Food & Agriculture* 6(1): 1742516. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1742516>
- Gladwin T.N., Krause T.S., Kennelly J.J. (1995). Beyond eco-efficiency: Towards socially sustainable business. *Sustainable Development* 3(1): 35-43. <https://doi.org/10.1002/sd.3460030105>
- Grymshi D., Crespo-Cebada E., Elghannam A., Mesías F.J., Díaz-Caro C. (2022). Understanding consumer attitudes towards ecolabeled food products: A latent class analysis regarding their purchasing motivations. *Agribusiness* 38: 93-107. <https://doi.org/10.1002/agr.21714>
- Hair J.F., Black W.C., Babin B.J., Anderson R.E., Tatham R.L. (2006). *Análisis de datos multivariados*, 6th. Ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, Inglaterra. 874 pp.
- Henseler J., Ringle C.M., Sarstedt M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance based structural equation modelling. *Journal of the Academy of Marketing Science* 43(1): 115-135. <https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8>
- Henseler J. (2017). Bridging Design and Behavioral Research With Variance-Based Structural Equation Modeling. *Journal of Advertising* 46(1): 178-192. <https://doi.org/10.1080/00913367.2017.1281780>
- Hu L., Bentler P. M. (1998). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal* 6(1): 1-55. <https://doi.org/10.1080/10705519909540118>

- Hu Z., Zhang Q.F. (2024). Alternative agrifood systems and the economic sustainability of farmers' cooperatives: The Chinese experience. *Sustainable Development* 32(6): 7447-7460. <https://doi.org/10.1002/sd.3097>
- International Institute for Sustainable Development (IISD). (2024). From research to reality. How IISD is bringing solutions to life. Disponible en: <https://www.iisd.org/system/files/2024-10/iisd-annual-report-2023-2024.pdf> (Consultado: 30/01/2025).
- Khan F.U., Nouman M., Negrut L., Abban J., Cismas L.M., Siddiqi M.F. (2024). Constraints to agricultural finance in underdeveloped and developing countries: A systematic literature review. *International Journal of Agricultural Sustainability* 22(1): 2329388. <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2329388>
- Kryszak Ł., Świerczyńska K., Staniszewski J. (2023). Measuring total factor productivity in agriculture: A bibliometric review. *International Journal of Emerging Markets* 18(1): 148-172. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-04-2020-0428>
- Kurth T., Wübbels G., Portafaix A., Meyer zum Felde A., Zielcke S. (2021). The biodiversity crisis is a business crisis. Boston Consulting Group (BCG). Disponible en: <https://www.bcg.com/publications/2021/biodiversity-loss-business-implications-responses#:~:text=Many%20business%20activities%2C%20especialmente%20actividades,man%2Dmade%20pressure%20on%20biodiversity.> (Consultado: 15/01/2025)
- Lizcano-Prada J., Lombana-Coy J., De Haro T. (2018). Sustainability Standards in Banana Agribusiness: Identifying the Main Standards and Assurance Criteria. En: *Responsabilidad social corporativa: una mirada integral en América Latina* (Ed. Quintero, M. y Sánchez, M.), pp. 231-245. Programa Editorial Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Lizcano-Prada J., Mesías F.J., Lami O., Sama-Berrocal C., Maestre-Matos M. (2024). Gestión sostenible de los alimentos. Una aplicación de la Teoría del Comportamiento Planificado en el contexto de un país emergente: Colombia. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 120(4): 397-423. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.013>
- Maestre-Matos L.M., Páez A.P., Mesías F.J., Lombana-Coy J. (2019). Las cooperativas agrarias como modelo generador de negocios con inclusión social: el caso de las cooperativas bananeras del Magdalena (Colombia). *REVESCO: revista de estudios cooperativos* 132: 195-217. <https://doi.org/10.5209/reve.65488>
- Maestre-Matos M., Lombana-Coy J., Mesías F.J. (2023). Creation of shared value in cooperatives: informal institutions' perspective of small-sized banana growers from Colombia. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science* 28 (55): 134-159. <https://doi.org/10.1108/JEFAS-09-2021-0186>
- Mesías F.J., Martín A., Hernández A. (2021). Consumers' growing appetite for natural foods: Perceptions towards the use of natural preservatives in fresh fruit. *Food Research International* 150: 110749. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110749>
- Moshfeghi V., Jafari Y, Hoseini hasel S, Ahmadi I. (2020). An explanation of entrepreneurship drivers and rural competitiveness functions. *Housing and Rural Environment* 39(171): 103-116. <https://doi.org/10.22034/39.171.103>
- Nunnally J. C. (1994). *Psychometric theory* 3th Ed. Tata McGraw Hill Education, India. 752 pp.
- Ringle C. M., Götz O., Wetzels M., Wilson B. (2009). On the use of formative measurement specifications in structural equation modeling: A Monte Carlo simulation study to compare covariance based and partial least squares model estimation methodologies. *METEOR Research Memoranda* (RM/09/014). University Library of Munich. 43 pp. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2394054>.
- Sehgal S., Batool I. (2024). Economic Development: a study of the holistic examination of sustainable agriculture's substantial impact on developing nations. *South Asian Journal of Social Studies and Economics* 21(7): 241-248. <https://doi.org/10.9734/sajsse/2024/v21i7858>
- Sama C., Crespo-Cebada E., Díaz-Caro C., Escibano M., Mesías, F.J. (2018). Consumer preferences for foodstuffs produced in a socio-environmentally responsible manner: A threat to fair trade producers? *Ecological Economics* 150: 290-296. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.031>

- Snider A., Gutiérrez I., Sibelet N., Faure G. (2017). Small farmer cooperatives and voluntary coffee certifications: Rewarding progressive farmers of engendering widespread change in Costa Rica? *Food Policy* 69: 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.04.009>
- Tabares A., Lodoño-Pineda A., Cano J.A. Gómez-Montoya R. (2022). Rural Entrepreneurship: An Analysis of Current and Emerging Issues from the Sustainable Livelihood Framework. *Economies* 10(6): 142. <https://doi.org/10.3390/economies10060142>
- Vilké R., Gedminaitė-Raudonė Z. (2020). Collaboration between government and agribusiness for biogas production: balanced development of rural sustainability. *Public Policy and Administration* 19(2): 298-313. <https://doi.org/10.13165/VPA-20-19-2-11>
- Voora V., Larrea C., Huppé G., Nugnes F. (2022). Standards and Investments in Sustainable Agriculture. International Institute for Sustainable Development. Disponible en: <https://www.iisd.org/publications/report/ssi-review-standards-investments-sustainable-agriculture> (Consultado: 15/01/2025)
- Werts C.E., Linn R.L. Jöreskog K.G. (2017). Quantifying unmeasured 870 variables. En *Measurement in the Social Sciences* (Ed. Blalock, B.), pp. 270-292. Routledge, New York, NY, USA.
- Williams B., Onsmán A., Brown T. (2010). Exploratory factor analysis: a five-step guide for novices. *Australasian Journal of Paramedicine* 8(3): 990399. <https://doi.org/10.33151/ajp.8.3.93>
- (Aceptado para publicación el 17 de noviembre de 2025)

PREMIOS DE PRENSA AGRARIA 2025 DE LA ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO

La Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA) otorga un premio anual de Prensa Agraria para destacar aquel artículo de los publicados en ITEA en el año 2025 que reúna las mejores características técnicas, científicas y de valor divulgativo y de transferencia al sector, así como un impacto relevante de sus resultados. El artículo deberá reflejar el espíritu fundacional de AIDA de hacer de transmisor de conocimientos hacia el profesional, técnico o empresario agrario. Se concederá un premio, pudiendo quedar desierto.

Los premios se regirán de acuerdo a las siguientes

BASES

1. Podrán concursar todos los artículos que versen sobre cualquier tema técnico-económico-agrario.
2. Los artículos que podrán acceder al premio serán todos aquellos que se publiquen en ITEA en el año 2025. Consecuentemente, los originales deberán ser enviados de acuerdo con las normas de ITEA y aprobados por su Comité de Redacción.
3. El jurado estará constituido por las siguientes personas:
 - a) Presidencia de AIDA, que presidirá el jurado.
 - b) Dirección de la revista ITEA, que actuará de Secretario.
 - c) Dirección del CITA (Gobierno de Aragón).
 - d) Dirección del Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
 - e) Dirección de la Estación Experimental de Aula Dei.
 - f) Dirección del Instituto Pirenaico de Ecología.
4. El premio será anual y tendrá una dotación económica.
5. Las deliberaciones del jurado serán secretas, y su fallo inapelable.
6. El fallo del jurado se dará a conocer en la revista ITEA, y la entrega del premio se realizará con motivo de la celebración de las Jornadas de Estudio de AIDA.

Si desea Vd. pertenecer a la Asociación debe rellenar esta ficha de inscripción y la siguiente hoja sobre Protección de datos.

INSCRIPCIÓN EN AIDA

Si desea Vd. pertenecer a la Asociación rellene la ficha de inscripción y envíela a la siguiente dirección:

Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA). Avenida Montañana, 930, 50059 Zaragoza.

Si elige como forma de pago la domiciliación bancaria adjunte a esta hoja de inscripción el impreso de domiciliación sellado por su banco.

También puede hacer una transferencia a la cuenta de AIDA (Caixabank, Ag. Zuera (Zaragoza), España, nº ES70 2100 8687 2702 0001 2107) por el importe de la cuota anual. En ese caso, adjunte un comprobante de la transferencia.

Apellidos:		Nombre:	
NIF:			
Dirección Postal:			
Teléfono:		Fax:	e-mail:
Empresa:			
Área en que desarrolla su actividad profesional:			
		En _____, a ___ de _____ de 20__	
		Firma:	

FORMA DE PAGO (COUTA ANUAL: 50 EUROS)

<input type="checkbox"/>	Cargo a cuenta corriente (rellenar la domiciliación bancaria)
<input type="checkbox"/>	Transferencia a la cuenta de AIDA ES70 2100 8687 2702 0001 2107 (adjuntar comprobante)

DOMICILIACION BANCARIA

Sr. Director del Banco/Caja				
Muy Sr. mío,				
Ruego a Vd. se sirva adeudar en la siguiente cuenta corriente (IBAN: 24 caracteres)				
que mantengo en esa oficina, el recibo anual que será presentado por la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA) .				
Atentamente,				
En _____, a ___ de _____ de 20__		Sello de la Entidad:		
Firmado:				

PROTECCIÓN DE DATOS

ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO, de ahora en adelante AIDA, le informa de que los datos facilitados durante su relación con la Asociación serán tratados para gestionar el alta de socio, así como para las gestiones administrativas de la Asociación. La base legal para el tratamiento de sus datos es la relación contractual y su consentimiento. Sus datos podrán ser cedidos a las entidades que sea necesarias para el cumplimiento de nuestras obligaciones legales, y si así lo autoriza, a las empresas colaboradoras de la Asociación. Tiene derecho a acceder, rectificar, suprimir, oponerse al tratamiento de sus datos, así como retirar el consentimiento prestado y pedir su portabilidad.

AUTORIZACIONES

- * – Autoriza a que AIDA le envíe información a través de medios postales y/o electrónicos (correo electrónico, SMS, etc.) sobre noticias de la asociación, así como información de servicios de sus patrocinadores y/o colaboradores.
- Autoriza a que AIDA pueda facilitar sus datos de contacto a las empresas patrocinadoras o colaboradoras con fines comerciales. Sí No *

* Debe responder a estas cuestiones obligatoriamente.

Por último, en aras de dar cumplimiento al Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos, y siguiendo las Recomendaciones e Instrucciones emitidas por la Agencia Española de Protección de Datos (A.E.P.D.),

SE INFORMA

- Los datos de carácter personal solicitados y facilitados por usted, son incorporados a un fichero de titularidad privada cuyo responsable y único destinatario es AIDA, con domicilio en Avenida Montañana, no 930, 50059 - Zaragoza.
- Solo serán solicitados aquellos datos estrictamente necesarios para prestar adecuadamente los servicios solicitados, pudiendo ser necesario recoger datos de contacto de terceros, tales como representantes legales, tutores, o personas a cargo designadas por los mismos.
- Todos los datos recogidos cuentan con el compromiso de confidencialidad, con las medidas de seguridad establecidas legalmente, y bajo ningún concepto son cedidos o tratados por terceras personas, físicas o jurídicas, sin el previo consentimiento del socio, tutor o representante legal, salvo en aquellos casos en los que fuere imprescindible para la correcta prestación del servicio.
- Una vez finalizada la relación entre la Asociación y el socio, los datos seguirán archivados y conservados mientras sean necesarios para dar cumplimiento a las obligaciones legales o, en su defecto, serán devueltos íntegramente al socio (o autorizado legal) o suprimidos si así se solicita por su parte.
- Los datos que facilite serán incluidos en el Tratamiento denominado Socios de AIDA, con la finalidad de gestión del alta de socio, la gestión del servicio contratado, pago de cuotas, contacto, etc., y todas las gestiones relacionadas con los socios y manifiesto mi consentimiento.
- Tiene derecho a acceder a sus datos personales, a solicitar su rectificación, cancelación y oposición, indicándolo por escrito a AIDA con domicilio en Avenida Montañana, no 930, 50059 – Zaragoza, o al correo electrónico de la Asociación: administracion@aidaitea.org.
- Los datos personales serán cedidos por AIDA a las entidades que prestan servicios a la misma siempre que sea estrictamente necesario para llevar a cabo los servicios ofrecidos por la Asociación. Igualmente, sus datos serán cedidos si existe una obligación legal.

Nombre y apellidos del Socio:

DNI:

Representante legal (si lo hubiere):

DNI:

En _____, a ____ de _____ de 20__

FIRMA DEL SOCIO:

NORMAS PARA LOS AUTORES

Puede encontrar toda la información sobre como hacer los envíos,
las directrices de como hacer los manuscritos y las licencias
bajo las que se publican los artículos en nuestra web, en la URL
<https://www.aida-itea.org/index.php/revista-itea/envio-de-articulos>

Volumen 121

Número 4

Diciembre 2025

itea

información técnica económica agraria
www.aida-itea.org

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN INTERPROFESIONAL PARA EL DESARROLLO AGRARIO

