



**HAL**  
open science

## Integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en cultivos de café

Cristian Andrés Hernández-Salazar, Octavio Andrés González Estrada,  
Germán González-Silva

### ► To cite this version:

Cristian Andrés Hernández-Salazar, Octavio Andrés González Estrada, Germán González-Silva. Integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en cultivos de café. *Revista UIS Ingenierías*, 2024, 23 (4), pp.145. 10.18273/revuin.v23n4-2024012 . hal-04815497

**HAL Id: hal-04815497**

**<https://hal.science/hal-04815497v1>**

Submitted on 3 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License



# Integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en cultivos de café

---

## Integration of Artificial Intelligence and Precision Agriculture in Coffee Crops

Cristian Andrés Hernández-Salazar <sup>1a</sup>, Octavio Andrés González-Estrada <sup>1b</sup>, Germán González-Silva <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: 0000-0002-9915-6384 <sup>a</sup>, 0000-0002-2778-3389 <sup>b</sup>. Correo electrónico: [cahss77@gmail.com](mailto:cahss77@gmail.com) <sup>a</sup>, [agonzale@uis.edu.co](mailto:agonzale@uis.edu.co) <sup>b</sup>.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: 0000-0002-4642-1092. Correo electrónico: [germangs@uis.edu.co](mailto:germangs@uis.edu.co)

Recibido: 15 julio, 2023. Aceptado: 1 noviembre, 2024. Versión final: 26 noviembre, 2024.

### Resumen

La inteligencia artificial (IA) está transformando el sector agroindustrial al facilitar tareas como la predicción del clima, la detección de plagas y enfermedades, y la optimización del uso de agua y fertilizantes. Estas aplicaciones no solo aumentan la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas agrícolas, sino que también mejoran la productividad y la resiliencia frente al cambio climático. Este trabajo realiza una revisión sistemática sobre el uso de IA en la producción de café, analizando estudios encontrados en bases de datos reconocidas como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y Google Scholar. La búsqueda incluyó combinaciones de palabras como, "café" AND "machine learning", "inteligencia artificial" AND "agricultura de precisión", "detección de plagas" OR "redes neuronales", AND "sostenibilidad". Inicialmente se identificaron 452 artículos, de los cuales 85 cumplieron con los criterios de inclusión tras un riguroso proceso de selección y exclusión. La revisión identificó que las aplicaciones de IA en la producción cafetera se enfocan principalmente en la detección temprana de enfermedades como la roya del café mediante visión por computadora y redes neuronales convolucionales, la optimización de sistemas de riego inteligentes que integran sensores y algoritmos para reducir el consumo de agua hasta en un 20%, y el uso de robótica agrícola para mejorar la eficiencia operativa y disminuir la dependencia de mano de obra. Las tecnologías, además, fomentan prácticas más sostenibles y mejoran la trazabilidad en la cadena de suministro del café. Los resultados de esta revisión arrojan luces sobre cómo las técnicas de IA pueden optimizar la producción cafetera y contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles. Este trabajo ofrece un marco de referencia que puede ser útil para orientar investigaciones futuras y guiar a los productores hacia prácticas resilientes frente al cambio climático y las crecientes demandas de sostenibilidad.

**Palabras clave:** Aprendizaje profundo; FarmBot; *coffea arabica*; redes neuronales convolucional; agricultura inteligente.

### Abstract

Artificial intelligence (AI) is transforming the agribusiness sector by facilitating tasks such as weather prediction, pest and disease detection, and optimization of water and fertilizer use. These applications not only increase the efficiency and sustainability of agricultural systems, but also improve productivity and resilience to climate change. This paper conducts a systematic review on the use of AI in coffee production, analyzing studies found in recognized databases

such as Scopus, Web of Science, IEEE Xplore and Google Scholar. The search included combinations of keywords tailored to capture relevant studies, such as “coffee” AND “machine learning”, “artificial intelligence” AND “precision agriculture”, “pest detection” OR “neural networks”, and “sustainability”. Initially 452 articles were identified, of which 85 met the inclusion criteria after a rigorous screening and exclusion process. The review identified that AI applications in coffee production are mainly focused on the early detection of diseases such as coffee rust using computer vision and convolutional neural networks, the optimization of intelligent irrigation systems that integrate sensors and algorithms to reduce water consumption by up to 20%, and the use of agricultural robotics to improve operational efficiency and decrease labor dependence. The technologies also promote more sustainable practices and improve traceability in the coffee supply chain. The results of this review shed light on how AI techniques can optimize coffee production and contribute to the development of more efficient and sustainable agricultural systems. This work provides a framework that can be useful for guiding future research and guiding producers towards resilient practices in the face of climate change and increasing sustainability demands.

**Keywords:** Deep Learning; coffee arabica; convolutional neural networks; precision agriculture.

## 1. Introducción

La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una tecnología disruptiva con aplicaciones en numerosos sectores, desde la salud [1], [2] y la educación hasta la industria y el transporte [3], [4]. Gracias a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y optimizar procesos, la IA está transformando la forma en que se abordan los desafíos globales [5]. En este contexto, la agricultura de precisión ha sido una de las áreas más beneficiadas, permitiendo a los agricultores aprovechar herramientas avanzadas para mejorar la sostenibilidad, la productividad y la resiliencia de los cultivos [6]. La IA se ha utilizado para predecir el clima, permitiendo a los agricultores decidir cuándo sembrar y cosechar los cultivos, y protegerlos de condiciones meteorológicas adversas [7], [8], [9]. Además, la IA permite el seguimiento en tiempo real de los cultivos, detectando plagas, enfermedades y carencias de nutrientes [8]. Asimismo, estas tecnologías ayudan a los agricultores a tomar acciones preventivas y mejorar el rendimiento de sus cosechas [10]. Otro aspecto importante que se ha tratado en diversos trabajos es la optimización de los procesos de riego y fertilización mediante el análisis de datos del suelo y el clima, lo cual reduce costos e impactos ambientales [11], [12]. Este trabajo se centra en el impacto de la IA en la producción de café, un sector crítico en muchas economías, especialmente en regiones como América Latina.

En el contexto de la agricultura de precisión, la IA mejora la eficiencia en el uso de recursos y aumenta la resiliencia ante eventos climáticos extremos y presiones en la cadena de suministro, asegurando una producción agrícola más fuerte y sustentable [13]. La agricultura de precisión implica la gestión de información para mejorar la productividad agrícola [14]. En este sentido, se puede incluso combinar con el aprendizaje de máquina automatizado (AutoML) para la creación de modelos predictivos sin la necesidad de ajustes complejos,

permitiendo a los usuarios con poca experiencia en programación beneficiarse de estas tecnologías [15], [16], [17]. Un ejemplo destacado es el uso de IA en modelos de predicción del crecimiento y desarrollo de las plantas, como en el caso de modelos basados en la memoria a largo plazo espaciotemporal (ST-LSTM) y la red de memoria en memoria (MIM). Los modelos implementados mediante procesos de segmentación logran una identificación precisa de las plantas, utilizando secuencias de imágenes del crecimiento de las espigas obtenidas en períodos de 29 días para predecir el crecimiento futuro y desarrollo de las plantas [18], [19]. En Colombia, la agricultura de precisión se ha presentado como una técnica fundamental para aumentar la productividad y rentabilidad de los cultivos [20]. Esta técnica integra tecnologías de información geográfica, sensores y sistemas de posicionamiento global, facilitando a los agricultores la optimización del uso de insumos y recursos [20], [21], [22]. Herramientas como sensores de humedad del suelo, drones para la aplicación de pesticidas y fertilizantes, sistemas de riego automatizados y software de gestión de datos agrícolas se han convertido en elementos clave para optimizar la eficiencia y sostenibilidad de las actividades agrícolas [20], [21], [22]. Estudios comparativos han demostrado que la agricultura de precisión puede disminuir significativamente el tiempo necesario para tareas agrícolas estándar, lo que resalta su potencial para mejorar la eficiencia y productividad en las granjas colombianas [23], [24], [25]. Por otro lado, se han realizado diversas investigaciones centradas en el café, un producto característico de Colombia reconocido internacionalmente, abordando diferentes temas que cubren la cadena productiva [26]. Se destaca la genética de los cultivos, con el objetivo de mejorar la adaptación de las plantas y aumentar la productividad [27], [28], [29]. También se han estudiado nuevas técnicas de fermentación para la producción de cafés especiales y se han realizado comparativas entre abonos orgánicos, convencionales y sintéticos [28], [30].

El uso de la IA en la producción de café ha mostrado beneficios notables [31]. Tecnologías como redes de sensores inalámbricos, computación en la nube, Internet de las Cosas (IoT) y redes neuronales convolucionales (CNN) han aumentado la eficiencia y sostenibilidad de la cadena de suministro del café [32]. Estas tecnologías permiten a los productores de café enfrentar variaciones climáticas y mejorar la calidad del producto [33], [34], [35]. Además, el cultivo con agricultura de precisión disminuye el impacto ambiental al fomentar prácticas sostenibles, como el uso reducido de pesticidas y la prevención de la degradación del suelo [36]. La producción de café en Colombia también requiere considerar la sostenibilidad, minimizando el consumo de recursos y los efectos negativos en el entorno. Las tecnologías de IA contribuyen a la transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes, una necesidad creciente para cumplir con la demanda global de café de alta calidad [37]. En la agricultura de precisión, la IA se utiliza para mejorar la gestión de los cultivos, incrementar su productividad y calidad, y disminuir el impacto ambiental [38].

Entre las técnicas de IA aplicadas en el sector cafetero destacan la visión por computadora y el aprendizaje automático [39]. La visión por computadora permite el análisis de imágenes digitales para reconocer objetos, medir dimensiones, detectar anomalías o estimar variables de interés, lo cual es crucial para identificar plagas, enfermedades o deficiencias nutricionales en las plantas de café, y para estimar el rendimiento, la madurez o la calidad de los granos [40], [41]. El aprendizaje automático, por otro lado, permite a los sistemas informáticos aprender de los datos sin necesidad de una programación explícita, extrayendo patrones y relaciones entre las variables. Se usa para predecir el comportamiento de los cultivos de café en función de factores ambientales, genéticos o de control, y para clasificar los granos de café según sus atributos físicos o sensoriales [42], [43].

Además, el procesamiento del lenguaje natural, otra rama de la IA, se ocupa de comprender y manipular el lenguaje humano escrito o hablado, permitiendo extraer información relevante de documentos y redes sociales relacionados con el café, o generar descripciones y recomendaciones de productos basados en el café [44], [45], [46].

Las técnicas de IA ofrecen un gran potencial para mejorar la sostenibilidad, la rentabilidad y la competitividad de la industria cafetera, así como para satisfacer las demandas y preferencias de los consumidores. Sin embargo, también presentan desafíos técnicos, logísticos, éticos y sociales que deben abordarse de forma integral y

participativa para garantizar una implementación efectiva y responsable de la IA en el ámbito agrícola. Se requiere una mayor colaboración entre investigadores, productores, procesadores, comercializadores y consumidores de café, así como una mayor inversión en infraestructura, capacitación y regulación. También es necesario generar y difundir más conocimiento científico y empírico sobre las aplicaciones y los impactos de la IA en el cultivo y el consumo de café [47].

En este artículo, se revisan los avances recientes en el empleo de métodos de inteligencia artificial en la gestión agrícola de precisión aplicada a la producción de café, destacando los logros, desafíos y oportunidades futuras en este campo. La importancia de esta revisión radica en la creciente necesidad de abordar los retos que enfrenta la producción cafetera, como el impacto del cambio climático, la disminución de recursos naturales y las exigencias de sostenibilidad en mercados globales. La IA se ha posicionado como una herramienta clave para transformar los sistemas agrícolas tradicionales, permitiendo optimizar el uso de insumos, mejorar la detección de plagas y enfermedades, y fomentar prácticas más sostenibles. Este trabajo busca no solo sintetizar los avances más significativos en esta área, sino también proporcionar un marco de referencia que oriente a la comunidad científica en el desarrollo de investigaciones futuras. Además, pretende incentivar la implementación de soluciones innovadoras que fortalezcan la productividad y resiliencia de uno de los cultivos más relevantes a nivel global [48], [49], [50].

## 2. Metodología

Realizamos una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de la IA y la agricultura de precisión (AP) en el cultivo de café, siguiendo un enfoque metodológico riguroso y transparente. Este proceso se estructuró en varias etapas para asegurar exhaustividad y validez en los resultados. En la primera etapa, se realizaron búsquedas en bases de datos académicas ampliamente reconocidas, como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y Google Scholar. Las palabras clave seleccionadas incluyeron combinaciones como "café" AND "machine learning", "inteligencia artificial" AND "agricultura de precisión", "detección de plagas" OR "redes neuronales", AND "sostenibilidad". Las combinaciones indicadas permitieron capturar una amplia gama de estudios relevantes para AP e IA en la producción de café, abarcando desde innovaciones tecnológicas hasta análisis de impacto en sostenibilidad. El proceso de búsqueda inicial recuperó un total de 452 artículos. Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se descartaron 367 estudios por no cumplir con los requisitos de relevancia temática, calidad metodológica o accesibilidad.

Finalmente, se seleccionaron 85 artículos que constituyeron el corpus para el análisis detallado, siendo referenciados 50 artículos. Los criterios de inclusión establecieron que los estudios debían enfocarse en la aplicación de IA en AP, particularmente en el contexto del café, y publicarse entre 2010 y 2023 en inglés o español. Los artículos teóricos sin datos empíricos, publicaciones duplicadas y estudios sin acceso a texto completo fueron excluidos. Esta estrategia sistemática permitió obtener una visión amplia y actualizada de los avances, oportunidades y desafíos en la implementación de IA y AP en el sector cafetero, apoyada en una visualización de relaciones entre términos clave generada con la herramienta para el análisis de redes bibliográficas VOSviewer, [Figura 1](#).

El proceso de selección fue esencial para garantizar la rigurosidad de la revisión, con tres fases principales de

análisis. En la primera fase, se revisaron títulos y resúmenes de los estudios recuperados, identificando aquellos que cumplían con los criterios de inclusión y descartando los irrelevantes.

En la segunda fase, se procedió a una lectura completa de los textos preseleccionados para evaluar la profundidad y calidad metodológica de cada estudio, descartando los que no proporcionaban suficiente información empírica o que no aplicaban metodologías adecuadas para la producción de café en particular. Finalmente, en la tercera fase, se realizó un análisis detallado y codificación de los artículos seleccionados, clasificándolos en categorías temáticas de acuerdo con las técnicas de IA utilizadas, aplicaciones en el cultivo de café, resultados y desafíos identificados.

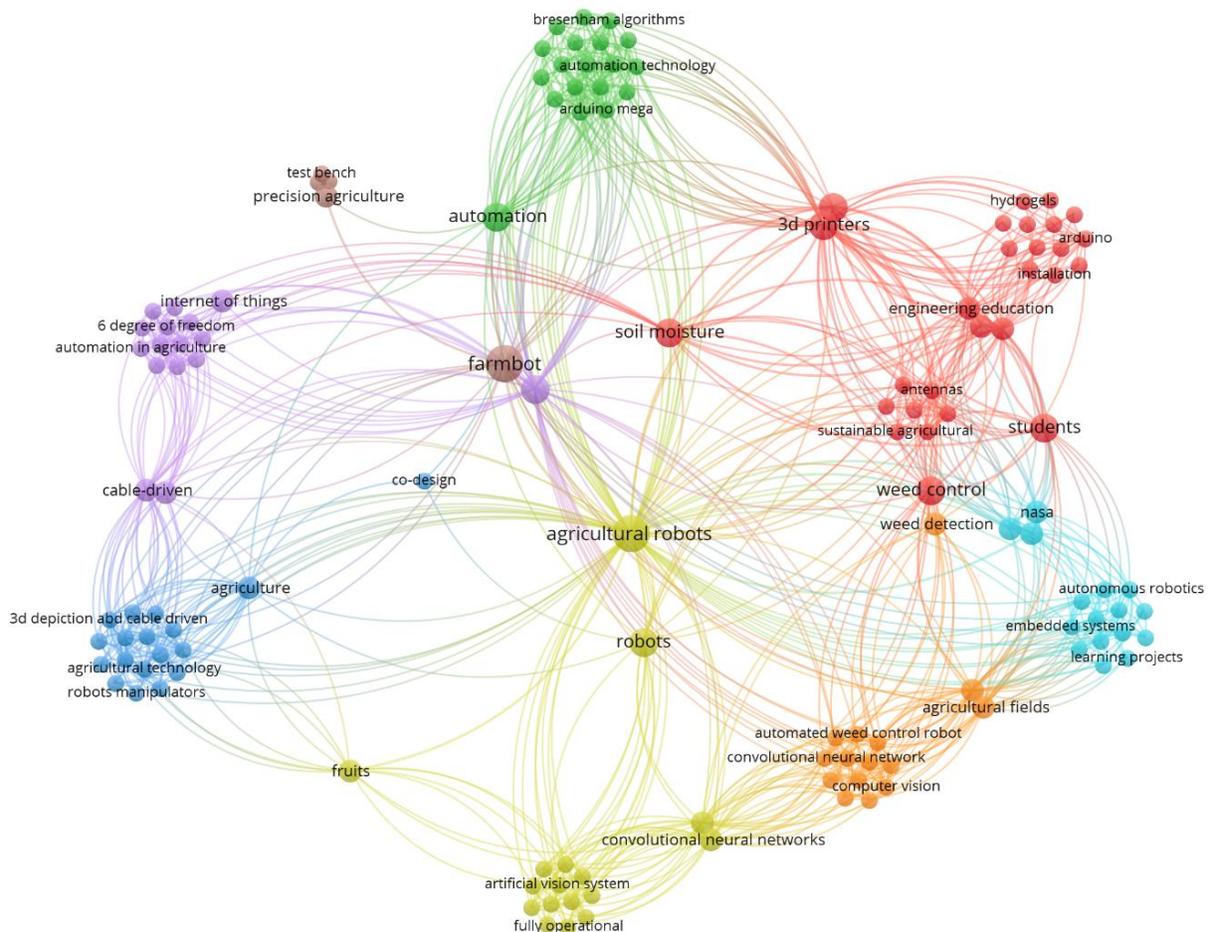


Figura 1. Visualización de redes de términos clave relacionados con la integración de IA y agricultura de precisión en el contexto agrícola. La figura, generada con VOSviewer, muestra en diferentes clusters los términos interconectados, que evidencian las áreas de investigación más destacadas en el campo, como "agricultural robots", "soil moisture", "weed control" y "artificial vision".

El análisis temático permitió identificar patrones y tendencias en la literatura, agrupando los estudios por áreas de aplicación de IA, tales como detección de enfermedades, optimización del uso de agua y nutrientes, robótica agrícola y sostenibilidad. Además, el análisis bibliométrico evaluó la producción científica en términos de volumen de publicaciones, colaboración entre autores e impacto de los estudios en el campo de la IA y AP, aportando una base sólida para interpretar el estado del arte y establecer una estructura de análisis de las aplicaciones de IA en el sector cafetero.

La detección y control de plagas y enfermedades en el cultivo de café ha avanzado significativamente con la incorporación de técnicas de inteligencia artificial, como la visión por computadora y las redes neuronales convolucionales. Estas herramientas hacen posible identificar de manera precisa y temprana problemas en las plantas a través del análisis de imágenes, lo que facilita decisiones informadas para fortalecer la salud de los cultivos y disminuir las pérdidas de producción [48]. En cuanto a la optimización de recursos, los sistemas de riego inteligentes que combinan sensores de humedad del suelo con algoritmos de IA permiten un riego preciso, logrando reducir el consumo de agua hasta en un 20 %, lo que no solo disminuye costos, sino que también contribuye a una mayor sostenibilidad ambiental [50]. El análisis de datos para la gestión de cultivos se fundamenta en la utilización de algoritmos de clustering y clasificación para identificar patrones en los datos de producción y mejorar las prácticas agrícolas [49]. La robótica agrícola también ha demostrado ser una innovación clave, con robots que usan IA y que pueden realizar tareas complejas como poda, recolección y clasificación de granos de café. El uso de IA no solo reduce la dependencia de la mano de obra, sino que también incrementa la productividad y garantiza una mayor calidad del producto final al clasificar los granos en función de su madurez y características físicas [48], [49]. En cuanto a la sostenibilidad y la eficiencia operativa, las aplicaciones de IA permiten optimizar el uso de recursos y reducir los impactos negativos en el medio ambiente, fomentando prácticas agrícolas más sostenibles [50].

Se revisaron las principales aplicaciones de la IA en la agricultura de precisión para la producción de café, los beneficios observados, y los desafíos y limitaciones reportados en la literatura. Para asegurar la calidad y validez del estudio, se consideraron criterios como la revisión por pares de los artículos incluidos, la replicabilidad de los métodos utilizados, y la exhaustividad de la búsqueda bibliográfica. Asimismo, se realizó una evaluación crítica de la metodología y los resultados de cada estudio para identificar posibles

sesgos y limitaciones. Esta metodología proporciona una base sólida para comprender el estado del arte en la integración de la IA y la agricultura de precisión en la producción de café, destacando los avances, desafíos y oportunidades futuras en este campo [48], [49], [50].

### 3. Resultados y discusión

La revisión de la literatura sobre la integración de la IA y la agricultura de precisión en la producción de café revela varios aspectos clave que han sido objeto de estudio. Esta sección presenta los principales hallazgos en áreas como la detección de plagas y enfermedades, la optimización del uso de recursos, la robótica agrícola y la sostenibilidad. Como se muestra en la **Tabla 1**, la cantidad de estudios revisados en cada tema resalta las áreas de mayor interés en la investigación, evidenciando la prioridad que se ha dado a ciertos aspectos para mejorar la productividad y sostenibilidad en la producción de café mediante el uso de IA. La **Tabla 1** proporciona una visión cuantitativa de cómo se distribuye el enfoque investigativo entre los temas clave.

Tabla 1. Temas de investigación relacionados con la integración de la IA y la agricultura de precisión en la producción de café y volumen de producción asociado

Tema de investigación	Cantidad de estudios revisados
Detección y Control de Plagas y Enfermedades	1915
Optimización del Uso de Agua y Nutrientes	179
Robótica Agrícola	129
Sostenibilidad y Eficiencia Operativa	121

#### 3.1. Detección y control de plagas y enfermedades

La detección y control de plagas y enfermedades en cultivos de café mediante IA es una de las aplicaciones más prometedoras en el ámbito de la agricultura de precisión. Las técnicas de visión por computadora y redes neuronales convolucionales (CNN) permiten analizar imágenes de alta resolución para identificar signos tempranos de enfermedades, como la roya del café, una de las amenazas más significativas para este cultivo. Los drones y sensores terrestres, equipados con cámaras avanzadas, capturan imágenes detalladas de las plantas, las cuales son procesadas por sistemas de IA que detectan patrones y anomalías indicativas de enfermedades [48], [51], [52]. Esta detección temprana permite a los agricultores intervenir de manera oportuna y aplicar tratamientos específicos, lo que contribuye a reducir

considerablemente las pérdidas de producción y a proteger la calidad del café [48], [51], [52].

El uso de tecnologías de IA ha demostrado ser particularmente eficaz en la identificación de plagas que afectan al café, como el Psílido asiático, un vector de enfermedades graves. Este insecto es especialmente difícil de detectar a simple vista, lo que hace que el monitoreo tradicional requiera un uso intensivo de mano de obra. Sin embargo, los sistemas de IA han facilitado la detección automática del Psílido asiático, analizando rápidamente grandes volúmenes de imágenes y señalando áreas de infestación con una alta precisión [48], [49]. El uso de tecnología basada en IA permite a los productores identificar de forma precisa los focos de plagas de manera precisa y sin depender de inspecciones manuales constantes, lo que optimiza los recursos y reduce el tiempo necesario para el control de estas amenazas [48], [49].

Además de mejorar la precisión y eficiencia en la detección, la IA también contribuye a aumentar la sostenibilidad en el manejo de plagas y enfermedades en los cultivos de café. La identificación temprana y localizada permite a los agricultores utilizar pesticidas de forma más selectiva, aplicándolos solo en las áreas afectadas, lo que reduce el impacto ambiental y los costos de producción [48], [51], [52]. Los datos recopilados mediante estas tecnologías, además, pueden ser integrados en sistemas de información agrícola para realizar un seguimiento continuo de la salud del cultivo y predecir posibles brotes, ayudando a los agricultores a implementar medidas preventivas [48], [49].

### 3.2. Optimización del uso de agua y nutrientes

La optimización del uso de agua y nutrientes en la producción de café se ha convertido en una prioridad para mejorar tanto la eficiencia como la sostenibilidad de los cultivos. En este contexto, la IA desempeña un papel crucial al integrar sistemas de riego inteligentes que combinan sensores de humedad del suelo con algoritmos de aprendizaje automático. Los sistemas que usan IA permiten un riego preciso y adaptativo, ajustando la cantidad de agua aplicada en función de las condiciones específicas de cada área del cultivo. Esta precisión ayuda a minimizar el consumo de agua, lo cual es particularmente relevante en regiones donde los recursos hídricos son limitados, al tiempo que maximiza el rendimiento del cultivo al evitar tanto el riego insuficiente como el exceso de agua [23].

Además de mejorar la gestión del riego, la IA permite reducir el consumo de agua hasta en un 20% sin comprometer el rendimiento, e incluso, en algunos casos,

logrando incrementarlo. La aplicación de estas tecnologías en el riego optimizado no solo contribuye a la sostenibilidad del cultivo de café, sino que también ayuda a reducir los costos operativos al disminuir la cantidad de agua utilizada en el proceso agrícola [48]. El enfoque mencionado, impulsado por la tecnología, es particularmente relevante en la producción de café, ya que las variaciones en la disponibilidad de agua pueden afectar significativamente la calidad y cantidad del grano cosechado. Así, la implementación de los sistemas de riego inteligentes permite a los productores ajustar sus prácticas en función de las condiciones climáticas y edáficas, garantizando un uso más eficiente del agua disponible [48].

Así como el riego, los modelos predictivos basados en IA también han transformado la aplicación de nutrientes en el cultivo de café. Los modelos de IA analizan datos del suelo y del clima para predecir con precisión las necesidades nutricionales de las plantas, lo que permite una aplicación precisa y oportuna de fertilizantes. Esta precisión ayuda a mejorar la salud del suelo, al reducir la sobreutilización de nutrientes que podría llevar a la degradación del suelo, y minimiza el impacto ambiental asociado con el uso excesivo de fertilizantes. De esta forma, los modelos de IA no solo optimizan el rendimiento del cultivo, sino que también promueven una gestión agrícola más respetuosa con el medio ambiente, un aspecto cada vez más demandado por los mercados y la sociedad en general [49], [53].

### 3.3. Robótica agrícola

La robótica agrícola impulsada por IA está transformando la producción de café al introducir sistemas automatizados que realizan tareas complejas de forma eficiente. Los robots equipados con IA pueden encargarse de labores críticas como la poda, recolección y clasificación de granos de café, lo cual no solo incrementa la eficiencia del proceso, sino que también reduce la dependencia de la mano de obra humana. Esta tecnología es especialmente valiosa en regiones donde la mano de obra agrícola es escasa o costosa, permitiendo que los agricultores gestionen sus cultivos de manera más efectiva. Además, la automatización de estas tareas asegura una mayor consistencia en las labores agrícolas, lo que contribuye a mantener la calidad y uniformidad del cultivo de café en el largo plazo [15], [51], [52].

Una de las aplicaciones más avanzadas de la robótica agrícola es el uso de robots recolectores que, mediante el empleo de IA, pueden identificar granos de café maduros con alta precisión y seleccionarlos cuidadosamente para la cosecha [51]. Los robots están equipados con sensores y algoritmos de visión por computadora que les permiten

analizar el estado de madurez de los granos y recolectarlos en el momento óptimo. La optimización de la calidad del producto final se logra al garantizar la cosecha de granos en su punto óptimo, reduciendo además el desperdicio y el tiempo dedicado a la recolección. Así, la tecnología robótica no solo contribuye a la eficiencia de la cosecha, sino que también ayuda a maximizar el valor del producto en los mercados de café de alta calidad [52].

Además, la colaboración entre sistemas robóticos aéreos y terrestres permite una gestión más integrada y precisa del campo. Los drones, por ejemplo, realizan un mapeo detallado de los cultivos, generando datos sobre el estado del suelo, la salud de las plantas y la presencia de plagas o enfermedades en áreas específicas [12]. La información suministrada es crucial para tomar decisiones informadas sobre el uso de insumos y la gestión del campo. Al integrar estos datos con los robots terrestres, que pueden ejecutar intervenciones específicas en las áreas problemáticas, se optimizan las operaciones agrícolas y se reduce significativamente el uso de insumos químicos. La colaboración de drones y robots terrestres representa un avance importante hacia prácticas agrícolas más sostenibles y precisas, contribuyendo a reducir el impacto ambiental de la producción de café [14], [19].

### 3.4. Sostenibilidad y eficiencia operativa

La sostenibilidad se ha convertido en un objetivo esencial dentro de la producción moderna de café, y la IA desempeña un rol fundamental en la consecución de este objetivo [3], [5]. La IA permite una optimización significativa en el uso de recursos, lo que reduce los impactos ambientales asociados con la agricultura intensiva. A través de sistemas avanzados, los productores pueden gestionar de manera más precisa aspectos clave como el riego, la fertilización y el control de plagas, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles que minimizan el uso excesivo de insumos. La gestión precisa favorece la sostenibilidad del entorno y mejora la eficiencia productiva, generando beneficios simultáneos en los ámbitos económico y ambiental [28], [30].

Los avances en IA facilitan también el cumplimiento de los estándares ambientales cada vez más estrictos que se imponen en el mercado del café. En respuesta a las crecientes demandas de sostenibilidad, los sistemas de IA ofrecen herramientas de gestión precisa que permiten a los productores ajustar sus prácticas agrícolas para cumplir con regulaciones ambientales sin comprometer la productividad [15]. La tecnología aplicada al riego, por ejemplo, asegura un uso responsable del agua, mientras que los sistemas de fertilización optimizados evitan la contaminación del suelo y de las fuentes hídricas

cercanas. Las prácticas sostenibles incrementan la eficiencia operativa en las fincas de café y facilitan el acceso de los productores a mercados que valoran y promueven productos agrícolas respetuosos con el medio ambiente [11], [23], [33].

Un beneficio adicional que la IA aporta a la producción de café es la mejora en la trazabilidad a lo largo de toda la cadena de suministro, garantizando que los productos cumplan con las normas de sostenibilidad desde la finca hasta el consumidor. La capacidad de seguimiento asegura que cada fase del proceso de producción respete los estándares de sostenibilidad, ofreciendo transparencia en las prácticas agrícolas y fortaleciendo la confianza de los consumidores [10]. La creciente demanda de productos éticos y sostenibles en el mercado ha impulsado la implementación de sistemas de IA para rastrear y verificar la procedencia y el cumplimiento de estos estándares, satisfaciendo así las expectativas de los consumidores conscientes que buscan productos de café con impacto positivo en el medio ambiente [11], [15].

### 3.5. Discusión

Los resultados de esta revisión indican que la integración de la IA en la agricultura de precisión para la producción de café ofrece numerosos beneficios, entre los que destacan mejoras en la eficiencia de las operaciones, la calidad del producto y la sostenibilidad ambiental. Las tecnologías avanzadas permiten optimizar el uso de recursos como el agua y los nutrientes, mejorar la detección temprana de plagas y enfermedades, y facilitar la automatización de tareas agrícolas complejas, contribuyendo así a una mayor productividad y a la reducción del impacto ambiental en el cultivo de café [10], [12]. La automatización a través de robots y drones, por ejemplo, no solo agiliza procesos como la recolección y monitoreo de cultivos, sino que también permite a los productores aplicar tratamientos específicos solo en las áreas que lo requieren, minimizando el uso de insumos químicos y promoviendo prácticas más sostenibles [13].

Sin embargo, para maximizar el potencial de la IA en el sector cafetero, es esencial superar varios desafíos que aún limitan su implementación. Uno de los principales obstáculos es el acceso y costo de la tecnología. La adopción de soluciones de IA suele implicar una inversión considerable en equipos y software especializados, lo cual puede ser prohibitivo para los pequeños productores de café [38]. El uso de tecnología costosa y poco accesible a los pequeños productores demuestra la necesidad de desarrollar tecnologías más accesibles y escalables, adaptadas a las condiciones de productores con recursos limitados [46]. Además, existen

alternativas como el modelo de plataformas compartidas o subsidios gubernamentales, que podrían facilitar el acceso a estas tecnologías y fomentar su adopción en comunidades rurales.

Otro aspecto fundamental es la dependencia de la IA en la disponibilidad de datos precisos y de alta calidad. Los sistemas de IA requieren grandes volúmenes de datos para su entrenamiento y funcionamiento óptimo, pero en muchas regiones productoras de café, la infraestructura de datos es insuficiente o inadecuada [10], [23]. Esta limitación puede restringir la capacidad de los sistemas de IA para brindar resultados confiables y útiles. Por lo tanto, es crucial que los gobiernos e instituciones inviertan en infraestructuras de datos robustas, incluyendo redes de sensores y sistemas de monitoreo continuo, que permitan una recopilación y análisis de datos más efectivos en el campo [15], [22].

Además, la capacitación y el conocimiento técnico necesarios para el uso eficaz de las tecnologías de IA representan otro desafío importante. La mayoría de los agricultores no cuenta con los conocimientos técnicos necesarios para manejar herramientas de IA, lo que puede dificultar la adopción y el aprovechamiento de estas tecnologías [45], [46]. Programas de formación específicos, así como asistencia técnica continua, son necesarios para capacitar a los agricultores en el uso de estas herramientas, brindándoles las habilidades y conocimientos necesarios para aprovechar al máximo las innovaciones en IA [55]. La capacitación debe enfocarse tanto en el manejo operativo de la tecnología como en la interpretación de los datos generados, permitiendo a los agricultores tomar decisiones fundamentadas basadas en los análisis de inteligencia artificial.

Finalmente, existe una preocupación en torno a la sostenibilidad social de estas tecnologías. Aunque la IA tiene el potencial de transformar positivamente la producción de café, existe el riesgo de que la automatización reduzca las oportunidades de empleo en las comunidades agrícolas, afectando a trabajadores locales cuya subsistencia depende de labores tradicionales. Se plantea entonces la necesidad de un enfoque equilibrado en la implementación de IA, donde se consideren tanto los beneficios económicos como los impactos sociales, buscando maneras de que las comunidades puedan beneficiarse de estas tecnologías sin perder oportunidades laborales [55]. Iniciativas que promuevan la inclusión de trabajadores en roles complementarios a la tecnología, como el mantenimiento y la operación de sistemas de IA, podrían ayudar a mitigar estos efectos negativos y fomentar una transición justa hacia una agricultura más automatizada y sostenible.

#### 4. Conclusiones

La revisión sistemática de la integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en la producción de café ha revelado el potencial significativo de estas tecnologías para transformar las prácticas agrícolas en este sector. La inteligencia artificial, mediante el uso de técnicas avanzadas como redes neuronales convolucionales y el aprendizaje automático, ha impulsado mejoras notables en áreas clave, tales como la detección de plagas y enfermedades, la optimización del uso de recursos y la implementación de robótica agrícola. Además, la inteligencia artificial tiene el potencial de contribuir sustancialmente a una mayor sostenibilidad y eficiencia operativa, abordando desafíos críticos en el sector cafetero y promoviendo prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

La inteligencia artificial ha mostrado ser altamente efectiva en la detección temprana y precisa de plagas y enfermedades en los cultivos de café, empleando técnicas de visión por computadora y procesamiento de imágenes de alta resolución para identificar signos de infestación y enfermedad. Las herramientas disponibles facilitan intervenciones preventivas que disminuyen de manera significativa las pérdidas de cultivos y optimizan la calidad del producto final. La detección temprana de problemas, como la roya del café, es crucial, ya que permite aplicar tratamientos focalizados y en el momento oportuno, minimizando el daño y el uso de pesticidas. Este enfoque no solo optimiza los recursos, sino que también protege el ambiente y la salud del cultivo [7], [9], [53].

Por otro lado, los sistemas de riego inteligentes y los modelos predictivos basados en IA han demostrado su efectividad en la gestión de recursos como el agua y los nutrientes. Mediante el uso de sensores y algoritmos avanzados, estos sistemas permiten una administración más precisa, aplicando solo la cantidad necesaria de agua y nutrientes, lo que maximiza el rendimiento de los cultivos y minimiza el impacto ambiental. La gestión inteligente de riego ha demostrado reducir el consumo de agua hasta en un 20 %, lo que es fundamental en áreas donde el agua es un recurso limitado [23]. Además, los modelos de IA también pueden anticipar necesidades nutricionales de las plantas según las condiciones climáticas, promoviendo un uso responsable de fertilizantes y mejorando la salud del suelo [11], [30].

La implementación de robótica agrícola impulsada por inteligencia artificial está transformando la producción de café al automatizar tareas tradicionalmente manuales y mejorar la precisión en operaciones críticas. Los robots equipados con IA pueden realizar tareas como la poda,

recolección y clasificación de granos de café con alta precisión, mejorando la productividad y reduciendo la dependencia de la mano de obra humana. Los robots equipados con IA, que operan tanto en tierra como en el aire mediante drones, permiten una gestión integrada del campo. Por ejemplo, los drones realizan un mapeo detallado de los cultivos, identificando áreas que requieren atención, mientras que los robots terrestres pueden ejecutar intervenciones específicas. El uso de drones y robots terrestres optimiza las operaciones agrícolas, mejora la productividad y reduce el uso de insumos químicos, contribuyendo a una agricultura más sostenible [7], [22].

La inteligencia artificial está facilitando una transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles al optimizar el uso de recursos y mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del café. Las tecnologías desarrolladas no solo cumplen con los estándares ambientales, sino que también satisfacen la creciente demanda de los consumidores por productos de café éticos y sostenibles. La trazabilidad, habilitada por la inteligencia artificial, permite rastrear el origen y el proceso de producción del café, garantizando que cada etapa cumpla con las normas de sostenibilidad. Permite aumentar la transparencia y la confianza del consumidor, promoviendo una cadena de suministro más responsable y mejorando la competitividad de los productores en mercados que valoran la sostenibilidad [33], [34], [37].

Sin embargo, la adopción de tecnologías de inteligencia artificial implica una inversión significativa en infraestructura y equipos, lo que representa una barrera considerable, especialmente para pequeños productores de café. Muchos agricultores no disponen de los recursos necesarios para adquirir estas tecnologías avanzadas, lo que subraya la necesidad de desarrollar soluciones más asequibles y adaptadas a las condiciones de los productores. Opciones como plataformas compartidas, asociaciones con el sector privado o subsidios gubernamentales podrían facilitar el acceso a la inteligencia artificial, ayudando a democratizar su uso en el sector agrícola [32], [49].

Además, la efectividad de los sistemas de IA depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de los datos. Sin embargo, muchas regiones productoras de café carecen de infraestructuras de datos robustas, lo cual limita la capacidad de implementar estas tecnologías de manera efectiva. Los sistemas de IA requieren datos precisos y en tiempo real para funcionar óptimamente, lo cual exige redes de sensores y sistemas de monitoreo que no siempre están disponibles. Inversiones en infraestructura de datos, como redes de monitoreo climático y de suelo, son esenciales para proporcionar a

los sistemas de IA la información necesaria para operar con precisión [50].

Otro desafío importante radica en el conocimiento técnico requerido para usar la inteligencia artificial de manera efectiva. La falta de formación técnica y el desconocimiento sobre el uso de herramientas avanzadas pueden obstaculizar la adopción de inteligencia artificial en el campo. Para superar esta barrera, es fundamental implementar programas de capacitación y asistencia técnica que permitan a los agricultores comprender y utilizar estas tecnologías de manera óptima. Además, estos programas deben incluir formación en interpretación de datos para que los agricultores puedan tomar decisiones informadas basadas en los análisis proporcionados por la inteligencia artificial [48].

A partir de las líneas de trabajo identificadas en esta revisión, se plantea la necesidad de desarrollar investigaciones que profundicen en la accesibilidad de la inteligencia artificial para pequeños productores de café, explorando soluciones de bajo costo y plataformas colaborativas que permitan democratizar su uso. Asimismo, resulta relevante investigar la integración de sensores avanzados y algoritmos de aprendizaje automático en sistemas híbridos, como la combinación de robótica aérea y terrestre, para optimizar la gestión de cultivos en tiempo real. Otra línea prometedora es el diseño de modelos predictivos más precisos que consideren factores ambientales, climáticos y sociales, permitiendo a los productores tomar decisiones informadas y sostenibles. Además, es importante abordar las implicaciones éticas y sociales de la automatización agrícola, promoviendo un equilibrio entre los beneficios tecnológicos y el bienestar de las comunidades rurales. Las líneas propuestas pueden servir como fundamento para fortalecer el impacto de la inteligencia artificial en el sector cafetero y promover prácticas agrícolas más resilientes y responsables.

## Financiación

Los autores reconocen el apoyo de los proyectos VIE 3913 y VIE 3716 de la Universidad Industrial de Santander.

## Contribución de los autores

C.A. Hernández-Salazar: Preparación de datos, Análisis formal, Investigación, Redacción –borrador original. O.A. González-Estrada: Conceptualización, Preparación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Redacción –revisión y edición. G. González-Silva: Análisis formal,

Investigación, Redacción –borrador original, Visualización.

Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del artículo.

### Conflicto de interés

Declaramos que no existe ningún conflicto de intereses en relación con este artículo. Los autores no tienen intereses financieros, personales, ni profesionales que puedan influir en los resultados o en la interpretación de los hallazgos encontrados.

### Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

### Declaración de consentimiento informado

No aplica.

### Referencias

[1] J. F. Maldonado-Moreno, J. S. Martínez-Castañeda, Y. D. Beltrán-Malaver, I. C. Riveros-Pineda, G. D. Tovar-Hernández, “Metodología de producción de prótesis de miembro inferior: una revisión exhaustiva,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n2-2024011>

[2] P. Rajpurkar, E. Chen, O. Banerjee, and E. J. Topol, “AI in health and medicine,” *Nat Med*, vol. 28, no. 1, pp. 31–38, 2022, doi: <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01614-0>

[3] L. F. Ortiz-Torres, E. Gómez-Luna, and E. Marlés-Sáenz, “Estudio del uso y contribución de la inteligencia artificial para la operación en redes eléctricas,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n2-2024003>

[4] C. M. Ruiz-Díaz, B. Quispe-Suarez, O. A. González-Estrada, “Two-phase oil and water flow pattern identification in vertical pipes applying long short-term memory networks,” *Emergent Mater*, vol. 7, no. 5, pp. 1983–1995, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00631-2>

[5] C. A. Hernández-Salazar, A. Carreño-Verdugo, O. A. González-Estrada, “Prediction of the volume fraction of liquid-liquid two-phase flow in horizontal pipes using Long-Short Term Memory Networks,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 3, pp. 19–32, 2024, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n3-2024002>

[6] T. van Klompenburg, A. Kassahun, and C. Catal, “Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review,” *Comput Electron Agric*, vol. 177, p. 105709, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>

[7] J. Silva, N. Varela, and O. B. P. Lezama, “Multispectral image analysis for the detection of diseases in coffee production,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1237, pp. 198–205, 2021.

[8] K. Lagos-Ortiz, J. Medina-Moreira, A. Alarcón-Salvatierra, M. F. Morán, J. del Cioppo-Morstadt, and R. Valencia-García, “Decision Support System for the Control and Monitoring of Crops,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 901, pp. 20–28, 2019.

[9] E. Lasso, T. T. Thamada, C. A. A. Meira, and J. C. Corrales, “Graph Patterns as Representation of Rules Extracted from Decision Trees for Coffee Rust Detection,” in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 544, pp. 405–414, 2015.

[10] A. Sharma, A. Jain, P. Gupta, and V. Chowdary, “Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 9, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048415>

[11] A. R. Pereira, M. B. P. de Camargo, and N. A. V. Nova, “Coeficiente de cultivo de cafezais com base no índice de área foliar para irrigação de precisão,” *Bragantia*, vol. 70, no. 4, pp. 946–951, 2011, doi: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000400030>

[12] J. Jung, M. Maeda, A. Chang, M. Bhandari, A. Ashapure, and J. Landivar-Bowles, “The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems,” *Curr Opin Biotechnol*, vol. 70, pp. 15–22, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>

- [13] L. T. Wright, R. Robin, M. Stone, and D. E. Aravopoulou, "Adoption of Big Data Technology for Innovation in B2B Marketing," *Journal of Business-to-Business Marketing*, vol. 26, no. 3–4, pp. 281–293, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/1051712X.2019.1611082>
- [14] R. Gebbers, V. I. Adamchuk, "Precision Agriculture and Food Security," *Science*, vol. 327, no. 5967, pp. 828–831, 2010, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- [15] J. C. O. Koh, G. Spangenberg, S. Kant, "Automated Machine Learning for High-Throughput Image-Based Plant Phenotyping," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 5, p. 858, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13050858>
- [16] K. Y. Li et al., "An automated machine learning framework in unmanned aircraft systems: New insights into agricultural management practices recognition approaches," *Remote Sens*, vol. 13, no. 16, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13163190>
- [17] Y. Son, X. Zhang, Y. Yoon, J. Cho, and S. Choi, "LSTM-GAN based cloud movement prediction in satellite images for PV forecast," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 14, no. 9, pp. 12373–12386, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/S12652-022-04333-7/TABLES/8>
- [18] L. Zhang et al., "CA-U2-Net: Contour Detection and Attention in U2-Net for Infrared Dim and Small Target Detection," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 88245–88257, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3305942>
- [19] C. Wang et al., "Predicting Plant Growth and Development Using Time-Series Images," *Agronomy* 2022, vol. 12, no. 9, p. 2213, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12092213>
- [20] D. J. Pérez-Ortega, F. A. Bolaños-Alomia, A. Marco da Silva, "Variables que influyen en la aplicación de la agricultura de precisión en Colombia: revisión de estudios," *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, vol. 23, no. 1, p. 2298, 2021, doi: [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num1\\_art:2298](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2298)
- [21] E. Pino V., "Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología," *Idesia*, vol. 37, 2019, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- [22] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, P. Lorenz, "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture," *Sensors*, vol. 20, no. 4, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- [23] I. C. Arango-Palacio, "Oportunidades para la transformación digital de la cadena de suministro del sector bananero basado en software con inteligencia artificial," *Revista Politécnica*, vol. 17, no. 33, pp. 47–63, 2021, doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n33a4>
- [24] J. J. O. Rodríguez, J. G. A. Marín, D. C. P. Montiel, "Comparison of Performance in Mechanised Agricultural Tasks Between Precision and Conventional Agriculture on Farms in Tolima (Colombia)?," *Revista de Gestão Social e Ambiental*, vol. 16, no. 3, p. e03099, 2022, doi: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n3-014>
- [25] Y. A. Montoya Alvarez and J. I. Rodríguez Molano, "Colombian agriculture: approaching agriculture 4.0," *Ingeniería Solidaria*, vol. 18, no. 2, pp. 1–19, 2022, doi: <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2022.02.04>
- [26] J. C. García L., H. Posada-Suárez, and P. Läderach, "Recommendations for the Regionalizing of Coffee Cultivation in Colombia: A Methodological Proposal Based on Agro-Climatic Indices," *PLoS One*, vol. 9, no. 12, p. e113510, 2014, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113510>
- [27] Y. K. Kang, S. H. Im, J. S. Ryu, J. Lee, H. J. Chung, "Simple visualized readout of suppressed coffee ring patterns for rapid and isothermal genetic testing of antibacterial resistance," *Biosens Bioelectron*, vol. 168, p. 112566, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112566>
- [28] A. Simon-Gruita, M. D. Pojoga, N. Constantin, and G. Duta-Cornescu, "Genetic Engineering in Coffee," in *Caffeinated and Cocoa Based Beverages*, Elsevier, 2019, pp. 447–488.
- [29] R. Li et al., "Optimizing drip fertigation at different periods to improve yield, volatile compounds and cup quality of Arabica coffee," *Front Plant Sci*, vol. 14, p. 1148616, 2023, doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1148616>

- [30] A. I. Magalhães Júnior et al., “A critical techno-economic analysis of coffee processing utilizing a modern fermentation system: Implications for specialty coffee production,” *Food and Bioproducts Processing*, vol. 125, pp. 14–21, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.10.010>
- [31] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, “Deep learning in agriculture,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, pp. 70–90, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- [32] Y. Kittichotsawat, V. Jangkrajarn, K. Y. Tippayawong, “Enhancing Coffee Supply Chain towards Sustainable Growth with Big Data and Modern Agricultural Technologies,” *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4593, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su13084593>
- [33] R. Gera and A. Jain, “Predicting Crop Yield in Smart Agriculture Using IoT and Machine Learning for Sustainable Development,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1939 CCIS, pp. 64–76, 2023, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-47055-4\\_6/COVER](https://doi.org/10.1007/978-3-031-47055-4_6/COVER)
- [34] K. K. Rai, “Integrating speed breeding with artificial intelligence for developing climate-smart crops,” *Molecular Biology Reports* 2022 49:12, vol. 49, no. 12, pp. 11385–11402, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/S11033-022-07769-4>
- [35] Y. Pham, K. Reardon-Smith, S. Mushtaq, G. Cockfield, “The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review,” *Clim Change*, vol. 156, no. 4, pp. 609–630, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/S10584-019-02538-Y/TABLES/1>
- [36] K. Gikunda, “Harnessing Artificial Intelligence for Sustainable Agricultural Development in Africa: Opportunities, Challenges, and Impact,” *Computers and Society*, 2024, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.06171>
- [37] R. C. de Oliveira, R. D. de S. Silva, “Artificial Intelligence in Agriculture: Benefits, Challenges, and Trends,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13, p. 7405, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13137405>
- [38] A. Yu. Fedosov, A. M. Menshikh, “Precision farming technologies in vegetable growing,” *Vegetable crops of Russia*, vol. 0, no. 6, pp. 40–45, 2022, doi: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-6-40-45>
- [39] M. J. Smith, “Getting value from artificial intelligence in agriculture,” *Anim Prod Sci*, vol. 60, no. 1, p. 46, 2020, doi: <https://doi.org/10.1071/AN18522>
- [40] H. Tayara, K. Chong, “Object Detection in Very High-Resolution Aerial Images Using One-Stage Densely Connected Feature Pyramid Network,” *Sensors*, vol. 18, no. 10, p. 3341, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/s18103341>
- [41] H. C. Bazame, J. P. Molin, D. Althoff, M. Martello, L. D. P. Corrêdo, “Mapping coffee yield with computer vision,” *Precis Agric*, vol. 23, no. 6, pp. 2372–2387, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09924-0>
- [42] I. H. Sarker, “Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions,” *SN Comput Sci*, vol. 2, no. 3, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/S42979-021-00592-X>
- [43] R. Oliveira, P. F. Lima, M. Cirillo, J. Martensson, and B. Wahlberg, “Trajectory Generation using Sharpness Continuous Dubins-like Paths with Applications in Control of Heavy-Duty Vehicles,” in *2018 European Control Conference (ECC)*, 2018, pp. 935–940.
- [44] A. Lenci, S. Padó, “Editorial: Perspectives for natural language processing between AI, linguistics and cognitive science,” *Front Artif Intell*, vol. 5, p. 1059998, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/FRAI.2022.1059998/BIBTEX>
- [45] R. Dara, S. M. Hazrati Fard, J. Kaur, “Recommendations for ethical and responsible use of artificial intelligence in digital agriculture,” *Front Artif Intell*, vol. 5, 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/frai.2022.884192>
- [46] J. P. Garcia Vazquez, R. S. Torres, and D. B. Perez Perez, “Scientometric Analysis of the Application of Artificial Intelligence in Agriculture,” *Journal of Scientometric Research*, vol. 10, no. 1, pp. 55–62, 2021, doi: <https://doi.org/10.5530/jscires.10.1.7>
- [47] E. Hysa, A. Kruja, N. U. Rehman, and R. Laurenti, “Circular Economy Innovation and Environmental Sustainability Impact on Economic Growth: An Integrated Model for Sustainable Development,” *Sustainability*, vol. 12, no. 12, p. 4831, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/su12124831>

[48] S. Huet et al., “Populations of the Parasitic Plant *Phelipanche ramosa* Influence Their Seed Microbiota,” *Front Plant Sci*, vol. 11, p. 540645, 2020, doi: <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.01075/BIBTEX>

[49] H. Tamiminia, S. Homayouni, H. McNairn, and A. Safari, “A particle swarm optimized kernel-based clustering method for crop mapping from multi-temporal polarimetric L-band SAR observations,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 58, pp. 201–212, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.010>

[50] X. Ge, J. Yu, F. Chen, F. Kong, and H. Wang, “Toward Verifiable Phrase Search Over Encrypted Cloud-Based IoT Data,” *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 16, pp. 12902–12918, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3063855>

[51] J. G. M. Esgario, P. B. C. de Castro, L. M. Tassis, and R. A. Krohling, “An app to assist farmers in the identification of diseases and pests of coffee leaves using deep learning,” *Information Processing in Agriculture*, vol. 9, no. 1, pp. 38–47, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.01.004>

[52] D. Velásquez, A. Sánchez, S. Sarmiento, M. Toro, M. Maiza, B. Sierra, “A Method for Detecting Coffee Leaf Rust through Wireless Sensor Networks, Remote Sensing, and Deep Learning: Case Study of the Caturra Variety in Colombia,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 697, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10020697>

[53] R. Selvanarayanan, S. Rajendran, S. Algburi, O. Ibrahim Khalaf, and H. Hamam, “Empowering coffee farming using counterfactual recommendation based RNN driven IoT integrated soil quality command system,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 6269, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56954-x>

[54] A. Sharma, A. Jain, P. Gupta, and V. Chowdary, “Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 9, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048415>

[55] Y. Liu, J. Ruiz-Menjivar, L. Zhang, J. Zhang, M. E. Swisher, “Technical training and rice farmers’ adoption of low-carbon management practices: The case of soil testing and formulated fertilization technologies in Hubei, China,” *J Clean Prod*, vol. 226, pp. 454–462, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.026>