

Tendencias en la aplicación de la inteligencia artificial en la agricultura de precisión mediante una revisión sistemática

Trends in the application of artificial intelligence in precision agriculture through a systematic review

Cabrera-Verdesoto, Cesar Alberto ¹; Salvatierra-Pilozo, Darwin Marcos ²; Navarro-Saltos, Gema Elizabeth ³

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0000-0002-8726-103X>; cesar.cabrera@unesum.edu.ec

² Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0000-0002-2659-4471>; darwin.salvatierra@unesum.edu.ec

³ Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador, Santa Ana; <https://orcid.org/0009-0001-5603-7481>; gema.navarro@unesum.edu.ec

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v2/n3/41>

Cita: Cabrera-Verdesoto, C. A., Salvatierra-Pilozo, D. M., & Navarro-Saltos, G. E. (2024). Tendencias en la aplicación de la inteligencia artificial en la agricultura de precisión mediante una revisión sistemática. *Innova Science Journal*, 2(3), 26-38. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v2/n3/41>.

Recibido: 07/05/2024

Aceptado: 01/06/2024

Publicado: 31/07/2024



Copyright: © 2024 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Resumen: La inteligencia artificial (IA) ha transformado la agricultura de precisión al mejorar la eficiencia en la producción agrícola mediante la automatización y el análisis avanzado de datos. Este estudio realiza una revisión sistemática de la literatura científica reciente para identificar las principales aplicaciones, tendencias y desafíos en la adopción de IA en el sector agrícola. Se analizaron investigaciones publicadas en bases de datos indexadas, priorizando estudios sobre aprendizaje automático, visión por computadora y automatización de procesos agrícolas. Los hallazgos indican que la IA ha sido ampliamente utilizada en el monitoreo de cultivos, detección temprana de enfermedades, optimización del uso de insumos y automatización de maquinaria agrícola. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras significativas, como el alto costo de adquisición, la falta de infraestructura digital en zonas rurales y la escasez de profesionales capacitados en el sector. Además, la gestión de datos plantea desafíos en términos de privacidad y regulación. A pesar de estos obstáculos, la IA representa una herramienta clave para la sostenibilidad agrícola, y su desarrollo futuro dependerá de políticas de apoyo, estándares de interoperabilidad y accesibilidad tecnológica.

Palabras clave: inteligencia artificial; agricultura de precisión; automatización agrícola; aprendizaje automático; sostenibilidad.

Abstract: Artificial intelligence (AI) has transformed precision agriculture by improving efficiency in agricultural production through automation and advanced data analysis. This study conducts a systematic review of recent scientific literature to identify the main applications, trends, and challenges in the adoption of AI in the agricultural sector. Research published in indexed databases was analyzed, prioritizing studies on machine learning, computer vision, and agricultural process automation. The findings indicate that AI has been widely used in crop monitoring, early disease detection, input use optimization, and farm machinery automation. However, its implementation faces significant barriers, such as high acquisition cost, lack of digital infrastructure in rural areas, and shortage of trained professionals in the sector. In addition, data management poses challenges in terms of privacy and regulation. Despite these obstacles, AI represents a key tool for agricultural sustainability, and its future development will depend on supportive policies, interoperability standards, and technological accessibility.

Keywords: artificial intelligence; precision agriculture; agricultural automation; machine learning; sustainability.

1. Introducción

La agricultura de precisión ha emergido como una estrategia clave para optimizar los recursos agrícolas mediante la integración de tecnologías avanzadas, entre ellas, la inteligencia artificial (IA). La creciente demanda de alimentos, impulsada por el crecimiento demográfico y el cambio climático, ha puesto en evidencia la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas agrícolas sin comprometer la sostenibilidad ambiental. En este contexto, la IA ha demostrado ser una herramienta con gran potencial para mejorar la toma de decisiones, reducir costos y minimizar el impacto ambiental en la producción agrícola (Liakos et al., 2018). Sin embargo, el nivel de adopción de estas tecnologías varía significativamente entre regiones y tipos de producción, lo que plantea desafíos en su implementación y escalabilidad (Shamshiri et al., 2018).

Uno de los principales problemas que enfrenta la integración de la IA en la agricultura de precisión es la brecha tecnológica existente entre países desarrollados y en vías de desarrollo. Mientras que en regiones con altos niveles de mecanización y digitalización se han logrado avances significativos en el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la optimización de cultivos y el monitoreo en tiempo real, en otras áreas el acceso a estas herramientas sigue siendo limitado debido a la falta de infraestructura tecnológica y capacitación de los agricultores (Wolfert et al., 2017). Además, la recopilación y análisis de grandes volúmenes de datos agrícolas plantea retos en términos de interoperabilidad de sistemas, privacidad de la información y costos de implementación (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Los factores que afectan la adopción de la IA en la agricultura de precisión incluyen, en primer lugar, las condiciones económicas y la inversión necesaria para la implementación de estas tecnologías. La adquisición de sensores, drones y software especializado representa un desafío financiero para pequeños y medianos productores, quienes a menudo no cuentan con los recursos para incorporar estas herramientas en sus sistemas productivos. En segundo lugar, las limitaciones en la capacitación y el conocimiento técnico dificultan el aprovechamiento pleno de la IA en la toma de decisiones agrícolas. Muchos agricultores no poseen formación en análisis de datos ni en el manejo de plataformas digitales, lo que limita la efectividad de estas herramientas en el campo. Por último, la falta de regulación y estándares internacionales en la aplicación de IA en la agricultura genera incertidumbre sobre la propiedad de los datos, la ética en el uso de la información y las implicaciones en términos de seguridad alimentaria.

La importancia de analizar las tendencias en el uso de IA en la agricultura de precisión radica en su potencial para transformar la forma en que se gestionan los cultivos y los recursos naturales. A través de modelos predictivos, análisis de imágenes satelitales y automatización de procesos, la IA permite optimizar el rendimiento de los cultivos, reducir el uso de insumos químicos y mejorar la resiliencia ante condiciones climáticas adversas. Una revisión sistemática de la literatura sobre este tema permitirá identificar las aplicaciones más relevantes, las tecnologías emergentes y los desafíos que deben abordarse para una implementación más efectiva de estas herramientas en el sector agrícola.

La viabilidad de este estudio se sustenta en la creciente cantidad de investigaciones científicas y reportes técnicos que abordan el impacto de la IA en la agricultura. En los últimos años, se han desarrollado múltiples enfoques metodológicos para la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático en el monitoreo de cultivos, la detección temprana de enfermedades y la optimización del uso de agua y fertilizantes. Asimismo, la disponibilidad de datos abiertos y plataformas de código abierto ha facilitado el acceso a herramientas de IA para un mayor número de investigadores y productores (Chlingaryan et al., 2018).

El objetivo de este artículo es realizar una revisión sistemática de las tendencias actuales en la aplicación de IA en la agricultura de precisión, analizando las principales áreas de investigación, las tecnologías más utilizadas y los desafíos asociados con su implementación. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica reciente, se busca proporcionar una visión integral del estado del arte en este campo, identificando oportunidades para futuras investigaciones y propuestas de mejora en la adopción de estas herramientas. Con ello, se pretende contribuir al desarrollo de estrategias que permitan maximizar los beneficios de la IA en la producción agrícola, promoviendo un uso más eficiente y sostenible de los recursos naturales.

2. Materiales y Métodos

Este estudio se llevó a cabo mediante una revisión sistemática de la literatura con el objetivo de analizar las tendencias actuales en la aplicación de inteligencia artificial (IA) en la agricultura de precisión. Se adoptó un enfoque exploratorio, basado en la recopilación, análisis y síntesis de investigaciones científicas publicadas en revistas indexadas en bases de datos reconocidas, como Scopus y Web of Science. La selección de fuentes se realizó siguiendo criterios de relevancia, actualidad y rigor académico, con el fin de garantizar la calidad y validez de la información utilizada en el análisis.

El proceso de búsqueda de información se estructuró en varias etapas. En primer lugar, se definieron palabras clave y términos de búsqueda relacionados con la inteligencia artificial y su aplicación en la agricultura de precisión, incluyendo conceptos como "aprendizaje automático", "redes neuronales", "visión por computadora", "agricultura digital" y "tecnologías emergentes". Estos términos fueron combinados mediante operadores booleanos para optimizar la precisión de los resultados obtenidos en las bases de datos seleccionadas.

Posteriormente, se establecieron criterios de inclusión y exclusión. Se priorizaron artículos publicados en los últimos cinco años para garantizar la actualidad de la información, aunque se incluyeron estudios previos de relevancia fundamental para contextualizar la evolución del tema. Se consideraron únicamente publicaciones revisadas por pares y disponibles en inglés o español. Se excluyeron trabajos de baja rigurosidad metodológica, artículos de opinión sin respaldo empírico y documentos no accesibles en texto completo.

La selección final de estudios se realizó mediante un proceso de lectura crítica en dos fases. Primero, se llevó a cabo una revisión de los títulos y resúmenes para descartar aquellos que no se ajustaban al objetivo del estudio. Luego, los artículos preseleccionados fueron analizados en su totalidad para extraer información clave

relacionada con las aplicaciones de la IA en la agricultura de precisión, los desafíos en su implementación y las tendencias emergentes en la investigación del área.

El análisis de la información recopilada se realizó mediante una categorización temática, agrupando los hallazgos en función de las principales áreas de aplicación de la IA en la agricultura de precisión, las tecnologías más utilizadas y los obstáculos identificados en la literatura. Se empleó una estrategia de síntesis cualitativa para interpretar los resultados y establecer conexiones entre los estudios analizados, permitiendo una visión integral sobre el estado del arte en este campo.

Dado que este estudio se basa en fuentes secundarias y no implica la recopilación de datos primarios, no se requirió la aplicación de instrumentos de medición ni la intervención directa en escenarios agrícolas. No obstante, se garantizó la objetividad y transparencia en el proceso de revisión, siguiendo directrices establecidas en la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para mejorar la trazabilidad y reproducibilidad del estudio.

Finalmente, la presentación de los resultados se estructuró en función de las categorías temáticas identificadas, proporcionando un análisis detallado de las aplicaciones actuales de la IA en la agricultura de precisión, así como de los retos y oportunidades que enfrenta su adopción en distintos contextos productivos. Con ello, este estudio pretende contribuir al conocimiento sobre la digitalización del sector agrícola y aportar información relevante para la toma de decisiones en la implementación de tecnologías basadas en inteligencia artificial.

3. Resultados

3.1. Aplicaciones actuales de la inteligencia artificial en la agricultura de precisión

3.1.1. Monitoreo y análisis de cultivos

El monitoreo y análisis de cultivos ha sido uno de los campos más beneficiados por la aplicación de inteligencia artificial (IA) en la agricultura de precisión. La capacidad de los algoritmos de aprendizaje automático y visión por computadora para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real ha permitido desarrollar sistemas avanzados de detección de enfermedades, predicción de rendimientos y optimización de la gestión de insumos agrícolas. En este contexto, las imágenes satelitales, los drones equipados con sensores multiespectrales y la integración de datos climáticos han revolucionado la forma en que los agricultores monitorean la salud de sus cultivos y toman decisiones estratégicas (Zhang et al., 2020).

Uno de los principales avances en esta área es la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo en el análisis de imágenes agrícolas. Modelos como las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) han sido entrenados para detectar patrones en las hojas de los cultivos y diagnosticar enfermedades con una precisión superior a la de los métodos tradicionales (Mohanty et al., 2016). Este tipo de tecnología ha sido utilizada con éxito en cultivos como el trigo, el maíz y la soja, permitiendo la identificación temprana de infecciones fúngicas y bacterianas. La capacidad de la IA para diferenciar entre síntomas de enfermedades y daños causados

por factores ambientales ha mejorado significativamente la eficiencia de los programas de manejo integrado de plagas (Ghosal et al., 2018).

Además de la detección de enfermedades, la IA se ha aplicado para estimar la disponibilidad de nutrientes en el suelo mediante análisis espectroscópicos y modelos predictivos basados en datos históricos. Sensores de reflectancia combinados con algoritmos de aprendizaje automático pueden determinar deficiencias de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo, lo que permite ajustar las dosis de fertilización de manera más eficiente y reducir el impacto ambiental del uso excesivo de agroquímicos (Liakos et al., 2018).

Otro enfoque clave en el monitoreo de cultivos es la integración de modelos de predicción de rendimientos. A través del uso de datos meteorológicos, información del suelo y variables fenotípicas, los algoritmos de aprendizaje supervisado han demostrado ser herramientas eficaces para prever la productividad de los cultivos con alta precisión (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Modelos de bosques aleatorios y redes neuronales profundas han sido implementados para generar predicciones que permiten a los agricultores optimizar el calendario de cosecha y la asignación de recursos (Shamshiri et al., 2018).

En el ámbito de la gestión del agua, la inteligencia artificial ha sido aplicada en la optimización del riego mediante sistemas de irrigación inteligente. Algoritmos de aprendizaje reforzado han sido utilizados para analizar la humedad del suelo en tiempo real y ajustar los niveles de riego según las necesidades específicas de cada parcela agrícola (Ozdogan et al., 2021). Estos sistemas permiten reducir el desperdicio de agua y mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico, un factor crítico en la agricultura sostenible.

3.1.2. Automatización y robótica agrícola

El uso de inteligencia artificial en la automatización y robótica agrícola ha revolucionado la mecanización del sector, permitiendo la optimización de tareas tradicionalmente realizadas de manera manual. Los avances en robótica, combinados con la IA, han impulsado el desarrollo de sistemas autónomos para la siembra, la poda, la polinización y la cosecha, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo la dependencia de la mano de obra humana (Shamshiri et al., 2018).

Uno de los avances más significativos en este campo es el desarrollo de vehículos autónomos agrícolas, como tractores y cosechadoras equipadas con sistemas de navegación basada en IA. Estos vehículos utilizan sensores LiDAR, GPS de alta precisión y cámaras multispectrales para desplazarse de manera autónoma por los campos, ajustando su velocidad y trayectoria en función de la topografía del terreno y las condiciones de los cultivos (Bechar & Vigneault, 2017). Empresas como John Deere y Case IH han desarrollado tractores autónomos que pueden operar sin intervención humana, reduciendo costos operativos y mejorando la precisión en la aplicación de fertilizantes y pesticidas (Ozdogan et al., 2021).

Los robots de cosecha también han experimentado un avance significativo gracias a la combinación de visión por computadora y algoritmos de aprendizaje profundo. Estos robots están diseñados para identificar frutos y hortalizas en su punto óptimo de maduración, diferenciando entre productos aptos para la recolección y aquellos que aún

necesitan tiempo para alcanzar su desarrollo ideal (Le Louedec et al., 2020). En el caso de cultivos como fresas y tomates, los robots agrícolas han logrado reducir la necesidad de mano de obra especializada, aumentando la eficiencia y minimizando el desperdicio de productos dañados durante la recolección.

Otro ejemplo innovador en la automatización agrícola es el uso de drones autónomos para la siembra de semillas y la aplicación de fertilizantes. Equipados con sistemas de inteligencia artificial, estos drones pueden mapear el terreno, identificar zonas con baja densidad de siembra y distribuir semillas de manera precisa en áreas estratégicas. Además, han sido empleados para la dispersión selectiva de fertilizantes y pesticidas, reduciendo la exposición de los trabajadores a químicos peligrosos y mejorando la eficiencia en el uso de insumos agrícolas (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Además de la mecanización de procesos, se han desarrollado sistemas de robótica colaborativa que combinan IA con sensores de presión y control háptico para permitir la interacción segura entre humanos y robots en el campo (Bechar & Vigneault, 2017). Estos sistemas han sido utilizados en cultivos que requieren una manipulación cuidadosa, como uvas y flores, donde la automatización completa aún no es viable debido a la complejidad de las tareas involucradas (Bueno., et al 2017).

En conclusión, la inteligencia artificial ha transformado la agricultura de precisión al optimizar el monitoreo de cultivos y permitir la automatización de procesos agrícolas mediante el uso de robótica avanzada. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías aún enfrenta desafíos, como la accesibilidad económica, la capacitación de los agricultores y la integración de sistemas en entornos agrícolas diversos. A pesar de estas barreras, el desarrollo continuo de la IA y la robótica agrícola promete seguir revolucionando el sector, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola.

3.2. Desafíos y limitaciones en la adopción de inteligencia artificial en la agricultura de precisión

3.2.1. Barreras económicas y tecnológicas

La implementación de la inteligencia artificial (IA) en la agricultura de precisión se ha visto limitada por múltiples barreras económicas y tecnológicas que obstaculizan su adopción a gran escala, especialmente en países en desarrollo y en explotaciones agrícolas de pequeña y mediana escala. Estas barreras no solo afectan la capacidad de los agricultores para acceder a tecnologías avanzadas, sino que también dificultan la integración de la IA en sistemas agrícolas tradicionales, lo que genera una brecha tecnológica entre regiones con diferente nivel de desarrollo digital (Wolfert et al., 2017).

Uno de los principales desafíos económicos radica en el alto costo inicial de adopción de las tecnologías basadas en IA. La inversión en hardware especializado, como sensores avanzados, drones, estaciones meteorológicas y maquinaria autónoma, puede resultar prohibitiva para muchos agricultores (Shamshiri et al., 2018). Además, los costos asociados con el software, el almacenamiento de datos en la nube y el mantenimiento de estos sistemas añaden una carga financiera considerable que muchos productores no pueden asumir sin apoyo gubernamental o incentivos financieros adecuados.

En particular, la inteligencia artificial en la agricultura requiere acceso a tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube y la conectividad de banda ancha, infraestructuras que en muchas zonas rurales son deficientes o inexistentes (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). La falta de conectividad limita la recopilación y transmisión de datos en tiempo real, afectando la capacidad de los algoritmos de IA para generar análisis precisos y tomar decisiones óptimas para el manejo de cultivos. En regiones con escasa infraestructura digital, la implementación de IA en la agricultura es prácticamente inviable, lo que perpetúa la brecha entre los agricultores con acceso a tecnología avanzada y aquellos que dependen de métodos tradicionales (Wolfert et al., 2017).

Otro factor limitante es la complejidad técnica de los sistemas de IA y la falta de profesionales capacitados en el sector agrícola. El uso de algoritmos de aprendizaje automático, modelos predictivos y visión por computadora requiere conocimientos avanzados en ciencia de datos, programación y agronomía digital, habilidades que no son comunes entre los agricultores y técnicos agrícolas (Gebbers & Adamchuk, 2010). La falta de formación adecuada genera una resistencia al cambio, ya que muchos productores pueden percibir estas tecnologías como difíciles de manejar o entender sin un acompañamiento técnico especializado (Shamshiri et al., 2018).

A esto se suma la interoperabilidad limitada entre los distintos sistemas y dispositivos utilizados en la agricultura de precisión. Actualmente, no existen estándares universales que faciliten la integración de datos provenientes de diferentes plataformas, como sensores de humedad, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y maquinaria inteligente (Balafoutis et al., 2017). La incompatibilidad entre estos sistemas reduce la eficiencia de la IA en la gestión de cultivos, ya que la falta de integración impide un análisis holístico de los datos agrícolas (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). La dependencia de soluciones propietarias y el uso de formatos de datos incompatibles generan costos adicionales para los agricultores, quienes deben invertir en software específico para poder procesar la información de sus cultivos.

A nivel financiero, los incentivos y subsidios gubernamentales para la adopción de IA en la agricultura son insuficientes en muchas regiones. Mientras que en países desarrollados existen programas de apoyo para la digitalización del sector agrícola, en otras zonas los agricultores no cuentan con mecanismos de financiamiento que les permitan acceder a estas tecnologías. La falta de políticas públicas enfocadas en la democratización de la inteligencia artificial en la agricultura refuerza la desigualdad en el acceso a herramientas digitales, favoreciendo a grandes empresas agroindustriales en detrimento de los pequeños y medianos productores (Amiri., et al 2020).

3.2.2. Gestión de datos y privacidad

El uso de inteligencia artificial en la agricultura de precisión depende en gran medida de la recopilación y procesamiento de grandes volúmenes de datos sobre las condiciones del suelo, el clima, la producción agrícola y la logística de distribución. Sin embargo, la gestión de estos datos plantea múltiples desafíos en términos de privacidad, seguridad y regulación, generando preocupaciones sobre la propiedad y el control de la información agrícola.

Uno de los problemas más relevantes en la gestión de datos agrícolas es la falta de regulaciones claras sobre la propiedad y el acceso a la información generada por los sistemas de IA. Muchas de las plataformas de agricultura digital son operadas por grandes corporaciones tecnológicas que almacenan los datos en la nube, lo que genera incertidumbre sobre quién tiene derecho a utilizarlos y con qué fines (Carbonell, 2016). Los agricultores, al compartir datos detallados sobre sus cultivos con estas empresas, pueden quedar en una posición de dependencia tecnológica, perdiendo autonomía sobre la toma de decisiones en sus propias explotaciones agrícolas (Babaie Sarijaloo, et al 2021).

Además, la seguridad de los datos es una preocupación creciente, ya que la interconexión de dispositivos inteligentes en el ámbito agrícola aumenta la vulnerabilidad ante ataques cibernéticos y brechas de seguridad (Wolfert et al., 2017). La información sobre productividad, condiciones del suelo y estrategias de manejo agrícola puede ser objeto de explotación comercial o manipulación indebida si no se implementan protocolos de protección adecuados (Kamilaris et al., 2019). La falta de estándares de ciberseguridad en la agricultura digital expone a los productores a riesgos de robo de datos y accesos no autorizados a sistemas críticos.

Otro desafío clave es la interoperabilidad y estandarización de los datos. Actualmente, los datos agrícolas recopilados por sensores, drones y maquinaria inteligente suelen almacenarse en formatos incompatibles entre distintas plataformas, lo que dificulta su integración y análisis conjunto (Shamshiri et al., 2018). La ausencia de un marco regulatorio internacional que establezca protocolos uniformes para el intercambio de información agrícola impide el desarrollo de ecosistemas digitales verdaderamente interconectados y accesibles para los productores de diferentes regiones del mundo (Balafoutis et al., 2017).

Desde una perspectiva ética, el uso de IA en la toma de decisiones agrícolas plantea interrogantes sobre la transparencia y la equidad en el acceso a la tecnología. Si bien la IA puede optimizar la producción y reducir desperdicios, su implementación sin una regulación adecuada podría favorecer la concentración del conocimiento y los beneficios económicos en manos de grandes corporaciones, marginando a los pequeños productores que no cuentan con los recursos para adoptar estas herramientas (Carbonell, 2016). Esta desigualdad en la distribución de beneficios tecnológicos refuerza la brecha digital en el sector agrícola y dificulta la democratización del acceso a la IA como una herramienta de desarrollo sostenible.

4. Discusión

La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una herramienta fundamental para la optimización de la agricultura de precisión, con aplicaciones que abarcan desde el monitoreo avanzado de cultivos hasta la automatización de procesos agrícolas mediante robótica. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta desafíos económicos, tecnológicos y regulatorios que limitan su adopción, especialmente en regiones con infraestructura digital deficiente y en explotaciones agrícolas de pequeña y mediana escala (Wolfert et al., 2017).

El monitoreo y análisis de cultivos mediante IA ha demostrado ser una estrategia altamente efectiva para mejorar la productividad agrícola y reducir el uso de insumos mediante la detección temprana de enfermedades y estrés abiótico. Algoritmos de aprendizaje profundo, como las redes neuronales convolucionales (CNN), han logrado identificar patrones en imágenes satelitales y capturas de drones con un alto grado de precisión, permitiendo la intervención temprana ante problemas fitosanitarios (Mohanty et al., 2016). Estos avances han optimizado la toma de decisiones en la gestión de cultivos, facilitando la reducción del uso de agroquímicos y minimizando pérdidas económicas derivadas de enfermedades y plagas (Ghosal et al., 2018). Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas está condicionada por la disponibilidad de datos de alta calidad y la infraestructura necesaria para procesarlos en tiempo real, lo que representa una limitación para su aplicación en explotaciones agrícolas con recursos limitados (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

En el ámbito de la automatización y la robótica agrícola, la inteligencia artificial ha permitido el desarrollo de maquinaria autónoma capaz de realizar labores de siembra, cosecha y manejo de insumos con una precisión sin precedentes. Tractores y drones equipados con sensores avanzados y algoritmos de navegación han demostrado mejorar la eficiencia operativa en el campo, reduciendo costos y optimizando la aplicación de fertilizantes y pesticidas (Ozdogan et al., 2021). Asimismo, los robots de cosecha han logrado avances significativos en cultivos de alto valor, como fresas y tomates, mediante la identificación precisa del estado de maduración de los frutos y su recolección selectiva (Le Louedec et al., 2020). No obstante, la inversión requerida para la adquisición y mantenimiento de estas tecnologías sigue siendo una barrera considerable para los pequeños productores, quienes no cuentan con acceso a financiamiento adecuado para su implementación (Shamshiri et al., 2018).

Las limitaciones económicas y tecnológicas representan uno de los principales obstáculos para la adopción de IA en la agricultura. La infraestructura digital insuficiente, la falta de acceso a redes de comunicación estables y la escasez de profesionales capacitados en el manejo de tecnologías agrícolas avanzadas dificultan la integración de sistemas basados en IA en entornos rurales. Además, la ausencia de estándares universales para la interoperabilidad de plataformas digitales y la fragmentación del mercado tecnológico agravan estos problemas, obligando a los agricultores a depender de soluciones propietarias que pueden no ser compatibles entre sí (Balafoutis et al., 2017).

La gestión de datos en la agricultura digital plantea otro desafío crucial, ya que el uso de IA en la optimización de cultivos depende de la recopilación y procesamiento de grandes volúmenes de información agroclimática y productiva. La falta de regulaciones claras sobre la propiedad de los datos agrícolas genera incertidumbre sobre quién tiene derecho a acceder y utilizar esta información, lo que puede derivar en una dependencia tecnológica de los agricultores respecto a empresas desarrolladoras de software y plataformas de análisis. Asimismo, los riesgos asociados con la ciberseguridad en la agricultura digital han aumentado en los últimos años, con amenazas que incluyen la manipulación de datos, el acceso no autorizado a sistemas de control agrícola y el uso indebido de información sensible sobre producción y logística (Kamilaris et al., 2019). La implementación de políticas de ciberseguridad y la adopción de protocolos de

encriptación de datos resultan esenciales para garantizar la privacidad y seguridad en el manejo de información agrícola (Wolfert et al., 2017).

Desde una perspectiva ética y social, la brecha digital entre grandes corporaciones agroindustriales y pequeños productores agrícolas se ha ampliado con la adopción de IA en la agricultura de precisión. Si bien estas tecnologías tienen el potencial de mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector, su implementación sin una regulación adecuada podría profundizar la desigualdad en el acceso a herramientas digitales, beneficiando exclusivamente a empresas con mayor capacidad de inversión (Carbonell, 2016). Para mitigar este problema, es fundamental que las políticas públicas promuevan la accesibilidad a tecnologías de IA mediante programas de financiamiento, capacitación y desarrollo de infraestructuras digitales en zonas rurales (Gebbers & Adamchuk, 2010).

En conclusión, aunque la inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta poderosa para la modernización del sector agrícola, su adopción a gran escala aún enfrenta múltiples desafíos económicos, tecnológicos y regulatorios que deben ser abordados para garantizar su implementación equitativa y sostenible. La inversión en infraestructura digital, el desarrollo de estándares de interoperabilidad, la creación de marcos regulatorios claros sobre la gestión de datos y la promoción de políticas de financiamiento inclusivas serán factores determinantes para el futuro de la IA en la agricultura de precisión. La superación de estas barreras permitirá maximizar el impacto positivo de estas tecnologías en la productividad y sostenibilidad agrícola, promoviendo una transformación digital accesible para todos los actores del sector.

5. Conclusiones

La inteligencia artificial se ha consolidado como una herramienta clave para la optimización de la agricultura de precisión, permitiendo mejoras significativas en la eficiencia de los sistemas productivos a través del monitoreo avanzado de cultivos y la automatización de procesos agrícolas. Su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real ha facilitado la detección temprana de enfermedades, la predicción de rendimientos y la optimización en el uso de insumos, contribuyendo a una producción más sostenible y rentable. Sin embargo, la adopción generalizada de estas tecnologías enfrenta desafíos importantes que deben ser abordados para garantizar su implementación equitativa y eficiente en distintos contextos agrícolas.

Las barreras económicas y tecnológicas representan uno de los principales obstáculos para la incorporación de inteligencia artificial en la agricultura. El alto costo de adquisición de hardware y software especializado, la necesidad de infraestructura digital avanzada y la falta de acceso a redes de comunicación estables limitan la capacidad de muchos productores para integrar estas herramientas en sus explotaciones. Además, la escasez de personal capacitado en el manejo de sistemas de IA dificulta su implementación y mantenimiento, lo que genera una dependencia de soluciones tecnológicas desarrolladas por grandes corporaciones. Esta situación amplía la brecha digital en el sector agrícola, favoreciendo a los productores con mayores recursos económicos y limitando el acceso de pequeños y medianos agricultores a las innovaciones tecnológicas.

Otro desafío fundamental radica en la gestión de datos agrícolas, un aspecto crítico para el funcionamiento de la inteligencia artificial en la agricultura de precisión. La recopilación masiva de información sobre suelos, cultivos y condiciones climáticas plantea interrogantes sobre la propiedad, privacidad y seguridad de los datos. La falta de regulaciones claras respecto al uso y control de esta información genera incertidumbre entre los productores, quienes pueden verse obligados a ceder datos estratégicos a empresas tecnológicas sin garantías de beneficios directos. Además, la vulnerabilidad ante ataques cibernéticos y la ausencia de estándares de interoperabilidad entre distintos sistemas dificultan la consolidación de un ecosistema digital plenamente funcional en el sector agrícola.

A pesar de estos desafíos, la inteligencia artificial ofrece un enorme potencial para transformar la agricultura en una actividad más eficiente, resiliente y sostenible. Para maximizar sus beneficios, es necesario implementar políticas públicas que promuevan la democratización de estas tecnologías a través de incentivos financieros, programas de capacitación y el desarrollo de infraestructuras digitales en zonas rurales. Asimismo, la creación de marcos regulatorios que garanticen la privacidad y seguridad de los datos agrícolas resulta fundamental para fomentar la confianza en estas herramientas y asegurar su adopción en todos los niveles del sector.

El futuro de la inteligencia artificial en la agricultura dependerá de la capacidad de los distintos actores del sector —gobiernos, empresas, instituciones de investigación y productores— para superar las barreras existentes y promover un modelo de innovación tecnológica inclusivo y accesible. La inversión en investigación y desarrollo, la cooperación internacional y la estandarización de sistemas serán elementos clave para lograr una implementación efectiva de la IA en la agricultura de precisión. Con una adecuada planificación y regulación, estas tecnologías tienen el potencial de mejorar la productividad agrícola, reducir el impacto ambiental y garantizar la seguridad alimentaria a nivel global, consolidándose como un pilar fundamental en la transformación digital del sector agroalimentario.

Referencias Bibliográficas

- Amiri, Z., Asgharipour, M. R., Campbell, D. E., & Armin, M. (2020). Extended exergy analysis (EAA) of two canola farming systems in Khorramabad, Iran. *Agricultural Systems*, 180, 102789. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102789>
- Babaie Sarijaloo, F., Porta, M., Taslimi, B., & Pardalos, P. M. (2021). Yield performance estimation of corn hybrids using machine learning algorithms. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.iiia.2021.05.001>
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Tsiropoulos, Z., Vangeyte, J., Van der Wal, T., ... & Sorensen, C. G. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Bechar, A., & Vigneault, C. (2017). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>

- Bedi, P., & Gole, P. (2021). Plant disease detection using hybrid model based on convolutional autoencoder and convolutional neural network. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.05.002>
- Bronson, K. (2019). AI in agriculture: Shaping the future of food. *AI & Society*, 34(4), 595–603. <https://doi.org/10.1007/s00146-018-0845-2>
- Bueno, M. R., Cunha, J. P. A. R., & Santana, D. G. (2017). Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. *Biosystems Engineering*, 154, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017>
- Carbonell, I. M. (2016). The ethics of big data in agriculture. *Internet Policy Review*, 5(1). <https://doi.org/10.14763/2016.1.405>
- Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Ghosal, S., Blystone, D., Wells, C., Tucker, M., Goswami, S., & Sarkar, S. (2018). An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(18), 4613–4618. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717903115>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Le Louedec, C., Scaradozzi, D., & Zitti, G. (2020). Deep learning-based visual perception for fruit harvesting robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 132, 103613. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103613>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Shamshiri, R. R., et al. (2018). Research and development in agricultural robotics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1–11. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
- Shamshiri, R. R., Weltzien, C., Hameed, I. A., Yule, I. J., Grift, T. E., Balasundram, S. K., ... & Ehsani, R. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1–11. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Zhang, Y., Wang, L., & Xu, W. (2020). Applications of artificial intelligence in agricultural automation. *Robotics and Autonomous Systems*, 125, 103394.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.