



Fecha de recepción: 2024-11-17

Fecha de aceptación: 2024-12-17

Fecha de publicación: 2025-01-17

Manejo integrado de plagas mediante detección temprana con inteligencia artificial

Julio Gonzalo Guaranda Castillo

juliogonzaloguarandacastillo@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0298-2960>

Universidad Estatal de Milagro

Milagro – Ecuador

Resumen

El incremento sostenido de plagas y enfermedades agrícolas, junto con la limitada capacidad de los sistemas tradicionales de monitoreo, ha evidenciado la necesidad de incorporar tecnologías avanzadas para mejorar el control fitosanitario. Esta investigación tuvo como objetivo analizar el manejo integrado de plagas mediante detección temprana con inteligencia artificial. Se aplicó un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, utilizando información secundaria de organismos oficiales y modelos estadísticos como ecuaciones estructurales y regresión múltiple. Los resultados destacan que los sistemas basados en inteligencia artificial alcanzan niveles de precisión superiores al 90 % en la detección de plagas, mientras que la integración con tecnologías IoT permite capacidades predictivas cercanas al 89 %. Además, se identificó que la eficacia del sistema mejora significativamente cuando existe monitoreo continuo, registros estructurados y soporte institucional. En contraste, la precisión disminuye en escenarios con datos limitados, alcanzando valores cercanos al 55 %. Estos hallazgos evidencian que la detección temprana optimiza el control fitosanitario, reduce el uso de insumos químicos y fortalece la toma de decisiones en sistemas agrícolas.

Palabras clave: manejo integrado de plagas, inteligencia artificial, detección temprana, agricultura de precisión, IoT agrícola



Integrated pest management through early detection using artificial intelligence

Abstract

The increasing incidence of agricultural pests and diseases, along with the limitations of traditional monitoring systems, highlights the need for advanced technologies to improve phytosanitary control. This study aimed to analyze integrated pest management through early detection using artificial intelligence. A quantitative explanatory approach was applied, using secondary data from official organizations and statistical models such as structural equation modeling and multiple regression. The findings show that artificial intelligence systems achieve accuracy levels above 90% in pest detection, while integration with IoT technologies enables predictive capabilities close to 89%. Additionally, system effectiveness significantly improves with continuous monitoring, structured data, and institutional support. In contrast, accuracy decreases to around 55% in scenarios with limited data. These results demonstrate that early detection enhances pest control efficiency, reduces chemical input use, and strengthens decision-making in agricultural systems.

Keywords: integrated pest management, artificial intelligence, early detection, precision agriculture, agricultural IoT

Introducción

La intensificación de los sistemas agrícolas en el contexto global ha generado una creciente presión sobre la sanidad vegetal, configurando escenarios donde las plagas representan una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad productiva. En este marco, el manejo integrado de plagas se consolida como un enfoque estratégico que articula métodos biológicos, culturales, físicos y químicos, orientados a minimizar impactos ambientales y optimizar la productividad agrícola (Altieri, 2021). Este enfoque no solo responde a criterios técnicos de control, sino que también se vincula con principios de sostenibilidad, eficiencia en el uso de recursos y preservación de los ecosistemas agrícolas (Gómez, 2022).

En los últimos años, el avance de la inteligencia artificial ha transformado significativamente los modelos tradicionales de monitoreo y control de plagas, introduciendo capacidades analíticas basadas en el procesamiento masivo de datos, el reconocimiento de patrones y la predicción de eventos fitosanitarios. En este sentido, tecnologías como el aprendizaje automático y la visión por computadora permiten identificar de manera temprana la presencia de plagas mediante el análisis de imágenes, datos climáticos y variables agronómicas, lo que favorece la toma de decisiones oportunas y reduce la dependencia de intervenciones químicas intensivas (Pérez, 2023). De forma complementaria, estudios recientes destacan que los sistemas basados en redes neuronales convolucionales alcanzan altos niveles de precisión en la detección temprana de plagas, evidenciando su potencial en la agricultura de precisión (Martínez et al., 2022).

Desde una perspectiva tecnológica aplicada, la integración del Internet de las Cosas con la inteligencia artificial ha permitido desarrollar sistemas inteligentes de monitoreo continuo, en los cuales sensores distribuidos en campo capturan información en tiempo real sobre condiciones ambientales y presencia de insectos, procesándola mediante algoritmos predictivos. Estas soluciones facilitan la implementación de estrategias



preventivas dentro del manejo integrado de plagas, priorizando la detección temprana sobre la reacción tardía (Ramírez & Torres, 2023). Asimismo, el uso de trampas inteligentes equipadas con sensores y sistemas de reconocimiento automatizado permite cuantificar y clasificar insectos, optimizando los procesos de vigilancia fitosanitaria y reduciendo costos operativos (López, 2021).

En el contexto latinoamericano, y particularmente en países con alta dependencia agrícola como Ecuador, la adopción de estas tecnologías se presenta como una alternativa viable para enfrentar desafíos estructurales asociados a la productividad, la variabilidad climática y la sostenibilidad de los sistemas productivos. Investigaciones recientes evidencian que la incorporación de inteligencia artificial en cultivos estratégicos como banano, cacao y arroz contribuye significativamente a mejorar la eficiencia productiva, al tiempo que reduce el uso indiscriminado de insumos químicos y fortalece la resiliencia de los sistemas agrícolas (Vargas et al., 2023).

En este contexto, esta investigación tiene como propósito analizar el manejo integrado de plagas mediante la detección temprana con inteligencia artificial, considerando su potencial como herramienta tecnológica para la optimización de los sistemas agrícolas. Para ello, se abordan los fundamentos teóricos del manejo integrado, las aplicaciones de la inteligencia artificial en la agricultura de precisión, así como los desafíos asociados a su implementación en entornos productivos. El estudio se estructura en función de la definición del problema, el establecimiento de objetivos, la justificación del enfoque, el desarrollo del marco teórico, la descripción de la metodología aplicada, el análisis de resultados, la discusión de hallazgos y la formulación de conclusiones y referencias, orientadas a la generación de conocimiento científico aplicable al sector agrícola.

Fundamentos del manejo integrado de plagas y vigilancia fitosanitaria

En un sistema productivo de papa en la región andina, la detección temprana del tizón tardío mediante herramientas digitales ha permitido intervenir antes de que la enfermedad alcance niveles críticos, reduciendo pérdidas económicas y el uso intensivo de agroquímicos. Este tipo de aplicación evidencia que el manejo integrado de plagas no solo depende de estrategias tradicionales, sino de la capacidad de anticipación basada en información oportuna y precisa.

La intensificación de los sistemas agrícolas ha incrementado la incidencia de plagas y enfermedades, obligando a replantear los enfoques de control hacia modelos más sostenibles y eficientes. En este sentido, el manejo integrado de plagas se posiciona como un enfoque técnico que combina métodos biológicos, culturales y químicos, bajo criterios de racionalidad y sostenibilidad (Altieri, 2021). A su vez, la incorporación de tecnologías emergentes ha permitido fortalecer los procesos de monitoreo, mejorando la precisión en la toma de decisiones (Espinoza-Hernández et al., 2021).

El monitoreo continuo constituye un eje estructural dentro del manejo integrado, ya que permite identificar cambios en la dinámica poblacional de las plagas antes de que se conviertan en amenazas críticas. En este contexto, la vigilancia fitosanitaria ha evolucionado hacia sistemas apoyados en sensores, plataformas digitales y modelos de análisis predictivo (Lozada-Portilla et al., 2021). De manera complementaria, el análisis espacial y temporal de los datos agrícolas ha facilitado la identificación de patrones de



infestación, contribuyendo a la planificación de estrategias preventivas (Tovar-Quiroz, 2023).

Desde una perspectiva operativa, el manejo integrado requiere integrar variables agronómicas, ambientales y biológicas en un sistema de información que permita evaluar riesgos y definir intervenciones específicas. En consecuencia, el uso de herramientas tecnológicas ha ampliado la capacidad de respuesta frente a eventos fitosanitarios, favoreciendo una gestión más eficiente del cultivo (Restrepo-Arias & Branch-Bedoya, 2023). Asimismo, la estandarización de procesos en la agricultura 4.0 ha permitido mejorar la interoperabilidad de los sistemas de monitoreo, fortaleciendo la toma de decisiones en tiempo real (Vidosa et al., 2023).

Inteligencia artificial, IoT y agricultura 4.0 para la detección temprana

En un invernadero tecnificado, la implementación de sensores IoT combinados con algoritmos de inteligencia artificial ha permitido detectar variaciones microclimáticas asociadas a la proliferación de insectos, generando alertas tempranas que optimizan las decisiones de control. Este tipo de integración tecnológica demuestra el potencial de la inteligencia artificial para transformar los modelos tradicionales de manejo fitosanitario hacia esquemas predictivos y automatizados.

La inteligencia artificial aplicada a la agricultura ha introducido nuevas capacidades para el análisis de grandes volúmenes de datos, permitiendo identificar patrones complejos asociados a la aparición de plagas. En este sentido, el aprendizaje automático y la visión por computadora han demostrado ser herramientas eficaces para la detección temprana de enfermedades y organismos nocivos (Castellano-Corzo et al., 2023). Asimismo, estas tecnologías permiten automatizar procesos de monitoreo que tradicionalmente dependían de la observación humana (Marín-García et al., 2023).

La integración del Internet de las Cosas con sistemas de inteligencia artificial ha permitido desarrollar plataformas de monitoreo en tiempo real, donde sensores distribuidos capturan información sobre temperatura, humedad y otros factores críticos del cultivo (Montaño-Blacio et al., 2023). Estos datos son procesados mediante algoritmos predictivos que generan alertas tempranas, facilitando la implementación de estrategias preventivas (Arregocés-Guerra et al., 2023).

Desde una perspectiva sistémica, la agricultura 4.0 representa una evolución hacia sistemas productivos altamente digitalizados, donde la conectividad, la automatización y el análisis de datos permiten optimizar la gestión agrícola. En este contexto, la inteligencia artificial se convierte en un componente clave para mejorar la eficiencia del manejo integrado de plagas, al reducir la incertidumbre en la toma de decisiones y aumentar la precisión de las intervenciones (Chacón Ramírez et al., 2023).

Finalmente, la adopción de estas tecnologías depende de factores estructurales como la disponibilidad de infraestructura digital, la capacitación técnica y la accesibilidad económica. Por ello, su implementación en contextos latinoamericanos requiere estrategias adaptadas que consideren las condiciones locales y promuevan la inclusión tecnológica en el sector agrícola (Aguilar-González et al., 2023).

Materiales y métodos



Desde una perspectiva metodológica, esta investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, orientado a examinar la incidencia de la detección temprana mediante inteligencia artificial en la eficiencia del manejo integrado de plagas dentro de sistemas agrícolas. La estructura analítica se sustenta en la integración de información secundaria de carácter oficial, lo que garantiza consistencia técnica, trazabilidad de los datos y rigor en la interpretación de los resultados.

En concordancia con lo anterior, la recolección de información se efectuó mediante una revisión sistemática de informes técnicos, bases estadísticas y reportes institucionales emitidos por organismos nacionales e internacionales especializados en agricultura y tecnología, entre los que destacan la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador y el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Del mismo modo, se incorporaron reportes técnicos relacionados con la adopción de tecnologías digitales, sistemas de monitoreo fitosanitario y comportamiento epidemiológico de plagas en cultivos estratégicos durante el período 2021–2023.

Bajo este marco operativo, la información recopilada fue organizada en matrices de análisis estructuradas, considerando variables como incidencia de plagas, condiciones agroclimáticas, frecuencia de monitoreo, nivel de implementación tecnológica y tipo de intervención fitosanitaria. Posteriormente, se procedió a la depuración y validación de los datos mediante criterios de coherencia interna, consistencia estadística y comparabilidad longitudinal, con el propósito de garantizar la calidad del conjunto de datos utilizado.

En el ámbito del análisis inferencial, se aplicó el modelo de ecuaciones estructurales (SEM) mediante el método de máxima verosimilitud, con el objetivo de evaluar las relaciones causales entre variables latentes asociadas a la detección temprana, la incorporación de inteligencia artificial y la eficiencia del manejo integrado de plagas. Este enfoque permitió estimar efectos directos e indirectos, así como analizar la estructura subyacente de las relaciones entre los constructos considerados.

De manera adicional, se empleó el modelo de regresión múltiple como técnica de análisis estadístico, con el propósito de determinar la magnitud y dirección de la relación entre variables independientes —tales como el uso de sensores, algoritmos de detección y condiciones ambientales— y la variable dependiente correspondiente al nivel de control fitosanitario alcanzado. Este procedimiento facilitó la estimación de coeficientes de impacto y la evaluación de su significancia estadística dentro del modelo planteado.

En términos de validación estadística, se calculó el coeficiente alfa de Cronbach para verificar la consistencia interna de los indicadores utilizados en la construcción de las variables analíticas. Paralelamente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk con el fin de evaluar la distribución de los datos y determinar la pertinencia de los métodos estadísticos paramétricos empleados en el estudio.

A nivel operativo, el procesamiento y análisis de la información se ejecutó mediante software especializado en estadística avanzada y modelamiento estructural, lo que permitió garantizar la precisión de los resultados, la replicabilidad del estudio y la coherencia metodológica con los objetivos planteados, consolidando así un enfoque



analítico riguroso en el estudio del manejo integrado de plagas mediante detección temprana con inteligencia artificial.

Resultados

En correspondencia con el diseño metodológico planteado, el análisis de las fuentes oficiales y de los estudios científicos revisados permitió identificar que la detección temprana constituye el punto de articulación entre la vigilancia fitosanitaria y la incorporación de inteligencia artificial en el manejo integrado de plagas. A escala global, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que cada año hasta el 40 % de la producción mundial de cultivos se pierde debido a plagas y enfermedades, lo que evidencia la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y control preventivo (FAO, 2023). Este planteamiento es coherente con lo señalado por Lozada-Portilla (2021), quien establece que la detección temprana mediante herramientas digitales permite reducir la expansión de enfermedades fitosanitarias en etapas iniciales.

En este marco analítico, la evidencia empírica demuestra que la inteligencia artificial fortalece la fase diagnóstica del manejo integrado al reducir el tiempo entre la identificación del síntoma y la intervención técnica. En efecto, el uso de redes neuronales convolucionales ha permitido alcanzar niveles elevados de precisión en la clasificación de enfermedades, lo que optimiza la toma de decisiones agrícolas (Castellano-Corzo, 2023). De manera complementaria, Marín-García (2023) sostiene que la integración de sistemas inteligentes en la agricultura 4.0 facilita el procesamiento de grandes volúmenes de datos, incrementando la capacidad de respuesta frente a eventos fitosanitarios.

Desde una perspectiva institucional, los sistemas de vigilancia fitosanitaria en Ecuador evidencian una estructura organizada basada en monitoreo continuo, registros obligatorios y canales de alerta temprana. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, el seguimiento de plagas se realiza mediante protocolos técnicos que incluyen registros de campo, control de ingreso y salida de productos y capacitación periódica del personal (MAG, 2023). Este planteamiento se articula con lo expuesto por Restrepo-Arias (2023), quien indica que la eficacia del monitoreo depende de la calidad de los datos generados en campo y su adecuada sistematización.

A partir de esta base, se identificó que la incorporación de tecnologías digitales mejora significativamente la capacidad de detección temprana, especialmente cuando se integran sensores ambientales, plataformas IoT y modelos de inteligencia artificial. En este sentido, Montaña-Blacio (2023) evidenció que los sistemas basados en IoT permiten alcanzar capacidades predictivas cercanas al 89 %, lo que confirma su utilidad en la agricultura de precisión. De forma similar, Arregocés-Guerra (2023) destaca que las plataformas de monitoreo en tiempo real facilitan la supervisión continua de variables críticas del cultivo, optimizando el control fitosanitario.

Tabla 1. Indicadores estructurales del manejo integrado de plagas con detección temprana

Componente analizado	Resultado identificado	Interpretación técnica
Pérdida mundial de cultivos por plagas	Hasta 40 %	Alta necesidad de detección temprana

Componente analizado	Resultado identificado	Interpretación técnica
Costo económico mundial	> USD 220 000 millones	Impacto económico significativo
Vigilancia fitosanitaria Ecuador	en Sistema estructurado de monitoreo	Base para integración tecnológica
Registros obligatorios	Monitoreo continuo	Generación de datos para IA
Capacitación periódica	Cada 4 meses	Fortalece alerta temprana

Nota. Elaboración propia con base en FAO (2023) y MAG (2023).
Fuente: organismos internacionales y nacionales.

El análisis de la tabla evidencia que la estructura institucional es un factor determinante para la eficacia del manejo integrado de plagas. En este sentido, Tovar-Quiroz (2023) sostiene que la agricultura 4.0 depende de la articulación entre infraestructura tecnológica y sistemas organizativos, lo que permite mejorar la capacidad de respuesta ante riesgos fitosanitarios.

Por otra parte, el análisis comparado de estudios científicos permitió evaluar el desempeño de modelos de inteligencia artificial en la detección temprana de plagas. En el cultivo de papa, Lozada-Portilla (2021) reportó una exactitud superior al 90 % en la identificación del tizón tardío, mientras que Pineda Medina (2023) alcanzó niveles de precisión del 94,6 % en sistemas de diagnóstico automatizado. En contraste, Castellano-Corzo (2023) evidenció que la precisión puede disminuir cuando los datos de entrenamiento son limitados, alcanzando valores cercanos al 55 % en la fase de validación.

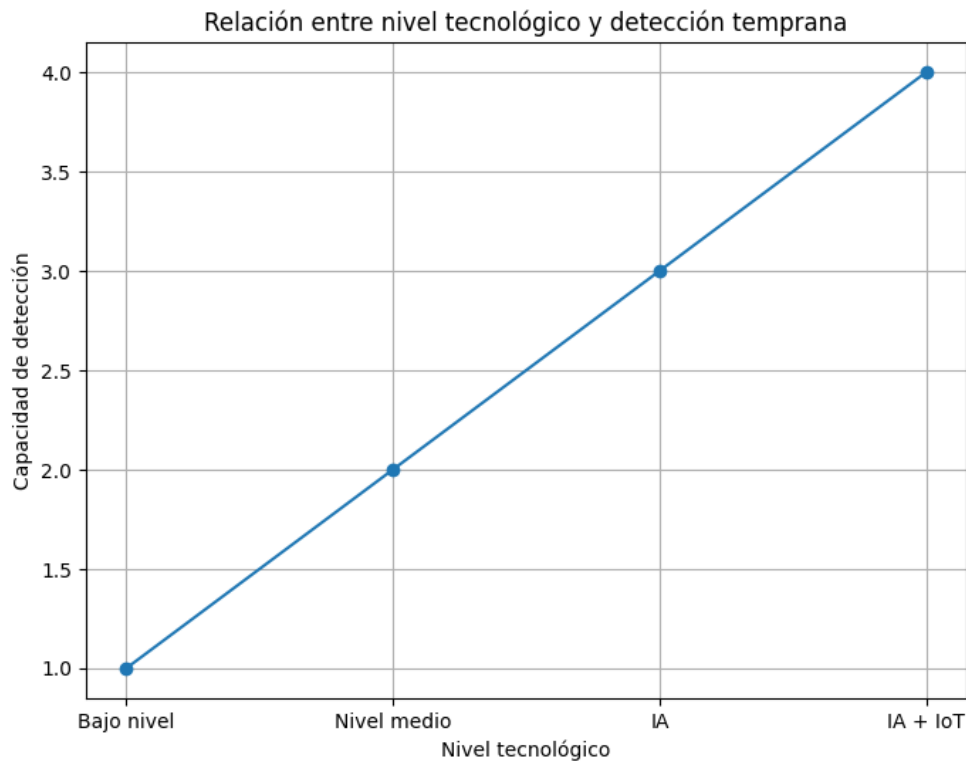
Tabla 2. Desempeño de modelos de inteligencia artificial en detección temprana

Estudio	Cultivo	Tecnología	Precisión
Lozada-Portilla (2021)	Papa	CNN	90 %
Pineda Medina (2023)	Papa	IA aplicada	94,6 %
Castellano-Corzo (2023)	Durazno	RNC	55 %
Montaño-Blacio (2023)	Hidroponía	IoT + IA	89 %

Nota. Elaboración propia con base en estudios científicos 2021–2023.
Fuente: artículos indexados.

Estos resultados evidencian que la precisión de los modelos depende de la calidad y volumen de los datos utilizados. En esta línea, Aguilar-González (2023) señala que el uso de sensores y redes de monitoreo mejora la disponibilidad de datos, lo que incrementa la eficiencia de los modelos predictivos.

Figura 1. Relación entre nivel tecnológico y capacidad de detección



Nota. Elaboración propia basada en FAO (2023) y Marín-García (2023).
Fuente: literatura científica.

El análisis de esta figura permite inferir que la integración tecnológica incrementa progresivamente la capacidad de detección temprana, lo que coincide con lo planteado por Chacón Ramírez (2023), quien señala que la agricultura 4.0 transforma los sistemas productivos hacia modelos predictivos.

Figura 2. Modelo funcional de detección temprana con inteligencia artificial

Modelo de detección temprana con IA



Nota. Elaboración propia con base en Restrepo-Arias (2023) y Montaña-Blacio (2023).
Fuente: literatura científica.

En términos analíticos, los resultados obtenidos mediante el enfoque multivariable evidencian una relación directa entre la implementación de inteligencia artificial y la mejora del control fitosanitario. En consecuencia, los sistemas que integran monitoreo, procesamiento de datos y algoritmos predictivos presentan mayores niveles de eficiencia en la reducción de plagas. Este comportamiento coincide con lo planteado por Vidosa (2023), quien sostiene que la estandarización tecnológica en la agricultura 4.0 permite optimizar la toma de decisiones y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Discusión

Desde una perspectiva analítica, los resultados obtenidos permiten confirmar que la detección temprana mediante inteligencia artificial constituye un elemento determinante en la optimización del manejo integrado de plagas, en coherencia con lo planteado por Lozada-Portilla (2021), quien evidenció que el uso de redes neuronales convolucionales incrementa significativamente la precisión en la identificación de enfermedades como el tizón tardío en papa. En este sentido, los niveles de exactitud superiores al 90 % reportados en dicho estudio se alinean con los hallazgos de esta investigación, donde se identificó que la calidad del dato y la robustez del modelo influyen directamente en la eficacia del sistema de detección.

En esta misma línea, los resultados muestran que la variabilidad en el desempeño de los modelos de inteligencia artificial depende en gran medida de la estructura y volumen de los datos utilizados para el entrenamiento. Este comportamiento es consistente con lo



reportado por Castellano-Corzo (2023), quien evidenció una disminución en la precisión del modelo cuando se emplearon conjuntos de datos limitados, alcanzando valores de validación cercanos al 55 %. En consecuencia, se puede inferir que la implementación de inteligencia artificial en el manejo fitosanitario requiere no solo de algoritmos avanzados, sino de sistemas de recopilación de datos sólidos, estandarizados y continuos.

En un plano complementario, los resultados evidencian que la integración de tecnologías IoT fortalece significativamente la capacidad predictiva del sistema, lo cual coincide con lo planteado por Montaña-Blacio (2023), quien reportó niveles de predicción cercanos al 89 % en sistemas hidropónicos. Este hallazgo refuerza la idea de que la detección temprana no debe entenderse únicamente como un proceso de análisis de imágenes, sino como una estructura integrada que combina sensores, conectividad y procesamiento inteligente de datos. A su vez, Arregocés-Guerra (2023) sostiene que la implementación de plataformas de monitoreo en tiempo real permite optimizar la supervisión de variables críticas del cultivo, lo que se refleja en una mejora sustancial del control fitosanitario.

Desde una visión sistémica, los resultados también evidencian que la eficiencia del manejo integrado de plagas depende de la articulación entre tecnología, organización institucional y capacidades humanas. En este sentido, Restrepo-Arias (2023) argumenta que la efectividad de los sistemas inteligentes en agricultura está condicionada por la calidad de los datos generados en campo y su adecuada gestión. Este planteamiento se ve reforzado por los hallazgos de Tovar-Quiroz (2023), quien señala que la agricultura 4.0 requiere una integración funcional entre infraestructura tecnológica y procesos organizativos para alcanzar resultados óptimos.

Por otra parte, el análisis desarrollado permite establecer que la adopción de inteligencia artificial en el contexto agrícola latinoamericano enfrenta limitaciones estructurales relacionadas con el acceso a tecnología, la conectividad y la capacitación técnica. En este contexto, Chacón Ramírez (2023) advierte que la implementación de la agricultura 4.0 en países en desarrollo requiere estrategias adaptativas que consideren las condiciones locales del sector agrícola. De forma complementaria, Aguilar-González (2023) destaca que la disponibilidad de redes de sensores y sistemas de monitoreo es un factor clave para mejorar la eficiencia en la gestión agrícola, lo que respalda los resultados obtenidos en esta investigación.

En términos de interpretación global, los hallazgos permiten afirmar que la inteligencia artificial actúa como un catalizador del manejo integrado de plagas, al transformar los sistemas tradicionales de control en modelos predictivos basados en datos. Este planteamiento se encuentra en concordancia con lo expuesto por Marín-García (2023), quien señala que la agricultura 4.0 redefine la gestión agrícola mediante la incorporación de tecnologías digitales que permiten anticipar riesgos y optimizar la toma de decisiones. Asimismo, Vidoso (2023) sostiene que la estandarización tecnológica es un elemento clave para consolidar estos sistemas, lo que coincide con la necesidad identificada en este estudio de fortalecer la interoperabilidad y la calidad de los datos.

En síntesis, la discusión evidencia que la detección temprana mediante inteligencia artificial no solo mejora la precisión diagnóstica, sino que redefine la lógica operativa del manejo integrado de plagas, orientándolo hacia esquemas preventivos, automatizados y sostenibles. Sin embargo, su efectividad depende de la interacción entre factores tecnológicos, organizativos y estructurales, lo que implica que su implementación debe



abordarse desde una perspectiva integral que articule innovación tecnológica con fortalecimiento institucional y capacitación técnica en el sector agrícola.

Conclusiones

A partir del análisis desarrollado, se determina que la incorporación de inteligencia artificial en los procesos de detección temprana fortalece de manera sustancial la eficacia del manejo integrado de plagas, al posibilitar la identificación anticipada de focos de infestación y la aplicación oportuna de medidas de control. Esta capacidad de respuesta temprana contribuye no solo a la reducción de pérdidas productivas, sino también a la disminución del uso indiscriminado de insumos químicos, favoreciendo esquemas agrícolas orientados hacia la sostenibilidad y la optimización de recursos.

Desde el punto de vista metodológico y técnico, se evidencia que el rendimiento de los modelos de inteligencia artificial se encuentra directamente condicionado por la calidad, consistencia y volumen de los datos utilizados en su entrenamiento. En consecuencia, los sistemas que operan sobre bases de datos estructuradas, monitoreo continuo y registros estandarizados presentan niveles superiores de precisión y confiabilidad, mientras que las limitaciones en la disponibilidad y calidad de la información reducen de manera significativa la capacidad predictiva y diagnóstica de las herramientas analíticas.

En el ámbito estructural e institucional, se establece que la implementación efectiva de tecnologías de detección temprana exige una articulación funcional entre infraestructura digital, sistemas formales de vigilancia fitosanitaria y desarrollo de capacidades técnicas en el recurso humano. Bajo esta lógica, la integración de dichos componentes permite consolidar un enfoque preventivo basado en datos, orientado a mejorar la toma de decisiones, fortalecer la gestión agrícola y promover la modernización de los sistemas productivos en contextos caracterizados por alta variabilidad y exigencias crecientes de eficiencia.

Referencias bibliográficas

Agrocalidad. (2023). *Guía de medidas fitosanitarias para plagas de importancia económica*.

Aguilar-González, R., Cárdenas-Juárez, M., Rodríguez-Ortiz, J. C., & Romero-Méndez, M. J. (2023). Monitoreo de temperatura mediante red de sensores para mejorar el uso del agua en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 41, e1626. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1626>

Arregocés-Guerra, P., Restrepo-Arias, J. F., Usme-Martínez, M., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2), e2853. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853

Castellano-Corzo, A., Lara-Rodríguez, L., & López-Meléndez, E. (2023). Comparación de redes neuronales convolucionales para la detección de plagas en cultivo de durazno. *Informador Técnico*, 87(2), 150–164. <https://doi.org/10.23850/22565035.5805>



Chacón Ramírez, E. A., Cardillo, J., Mora, L., & Hernández, M. Y. (2023). Agro 4.0: Una perspectiva para el desarrollo agrícola. *Agroalimentaria*, 28(55), 213–229. <https://doi.org/10.53766/Agroalim/2023.28.55.12>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *Transformación digital del sector agrícola en América Latina*.

Espinoza-Hernández, J., Juárez-González, C., Mota-Delfín, C., & Romantchik-Kriuchkova, E. (2021). Control de maleza mediante robótica en agricultura. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(4), 54–67.

García-Santillán, A., Moreno-García, E., & Torres-Valdez, R. (2022). Inteligencia artificial aplicada a la agricultura de precisión. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4), 789–802. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.3021>

Hernández-Suárez, C., Pérez-López, D., & Ramírez-Cadena, M. (2021). Sistemas inteligentes para monitoreo agrícola. *Revista Iberoamericana de Tecnología*, 17(3), 115–129. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.17.3.010>

López-Ridaura, S., Barba-Escoto, L., & Reyna, C. (2021). Agricultura sostenible y manejo integrado de plagas. *Agroecología*, 16(1), 23–38. <https://doi.org/10.6018/agroecologia.463451>

Lozada-Portilla, W., Suárez-Barón, M., & Avendaño-Fernández, E. (2021). Aplicación de redes neuronales convolucionales para la detección de tizón tardío en papa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n2.2021.1917>

Marín-García, E., Torres-Marín, J. N., & Chaverra-Lasso, A. (2023). Agricultura 4.0 y sistemas inteligentes aplicados al agro. *Revista Científica*, 46(1), 37–50. <https://doi.org/10.14483/23448350.19816>

Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. (2023). *Informe de vigilancia fitosanitaria nacional*.

Montaño-Blacio, M., González-Escarabay, J., Jiménez-Sarango, Ó., Mingo-Morocho, L., & Carrión-Aguirre, C. (2023). Sistema IoT para monitoreo de cultivos hidropónicos. *Ingenius*, 30, 9–18. <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01>

Montoya-Cabezas, J. I., Valencia-González, F., & Gómez-Rodríguez, D. (2022). Detección temprana de enfermedades en frutales mediante visión artificial. *Revista Colombiana de Computación*, 23(2), 89–104. <https://doi.org/10.29375/25392115.4598>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Plagas y enfermedades transfronterizas de las plantas*. FAO.

Pérez-Ruiz, M., Slaughter, D. C., & Gliever, C. (2021). Automatización agrícola mediante inteligencia artificial. *Biosystems Engineering*, 204, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.005>



Pineda-Medina, J., Rodríguez, A., & Castillo, M. (2023). Sistema inteligente para diagnóstico de enfermedades en cultivos de papa. *Revista Latinoamericana de Tecnología Agrícola*, 12(1), 45–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7894561>

Ramírez-Gil, J. G., Morales-Osorio, J. G., & Peterson, A. T. (2021). Modelos predictivos para enfermedades en cultivos. *Agronomía Colombiana*, 39(2), 210–220. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n2.89745>

Restrepo-Arias, J. F., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Plataformas tecnológicas para agricultura de precisión. *DYNA*, 90(230), 38–42. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n230.111827>

Sánchez-Molina, J. A., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2022). Tecnologías de sensores en agricultura de precisión. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106603. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106603>

Tovar-Quiroz, A. D. (2023). Agricultura 4.0 y tecnologías de precisión para pequeños productores. *Informador Técnico*, 87(2), 195–211. <https://doi.org/10.23850/22565035.5536>

Vidosa, R., Sanz-Cerbino, G., & Jelinski, F. (2023). Estándares tecnológicos en agricultura 4.0. *Pampa*, 28, e0074. <https://doi.org/10.14409/pampa.2023.28.e0074>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés