

Artículo Revisión

Agricultura inteligente para pequeños productores: tecnologías de precisión, oportunidades y desafíos

Smart agriculture for small-scale producers: precision technologies, opportunities, and challenges

Messias António Bumba^{1*}  

¹*Universidade de Luanda*

***Autor de correspondencia:** Messias António Bumba 

Recibido: 09-01-2024

Revisado: 16-01-2024

Aceptado: 23-01-2024

Publicado: 30-01-2024

Cómo citar este artículo: António Bumba, M. (2024). Agricultura inteligente para pequeños productores: tecnologías de precisión, oportunidades y desafíos. *Viterra*, 2(1), 1-20.
<https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/8>

RESUMEN

La agricultura inteligente representa una evolución de la agricultura de precisión mediante la integración de tecnologías digitales, sensores, sistemas de posicionamiento global (GPS), vehículos aéreos no tripulados, Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial, análisis de datos e imágenes satelitales para optimizar la producción agrícola y favorecer una gestión eficiente de los recursos naturales. En el contexto de los pequeños productores, estas tecnologías ofrecen alternativas para incrementar la productividad, mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y fortalecer la resiliencia frente a los efectos del cambio climático; sin embargo, su adopción continúa enfrentando importantes limitaciones económicas, tecnológicas e institucionales. El objetivo de esta revisión de alcance fue identificar las principales tecnologías de precisión empleadas en pequeñas explotaciones agrícolas, analizar las oportunidades derivadas de su implementación y sintetizar los desafíos que condicionan su adopción. La investigación se desarrolló siguiendo las directrices de PRISMA-ScR mediante la revisión de literatura científica, documentos técnicos e informes especializados publicados entre 2018 y 2023. Los resultados evidencian que la agricultura inteligente contribuye al monitoreo permanente de los cultivos, la optimización del riego y la fertilización, la detección temprana de plagas y enfermedades, la automatización de procesos y el fortalecimiento de la toma de decisiones basada en datos. Asimismo, se identifican beneficios relacionados con la reducción de costos operativos, el incremento del rendimiento productivo y la disminución del impacto ambiental. No obstante, persisten desafíos asociados con el acceso al financiamiento, la conectividad rural, la capacitación tecnológica y el desarrollo de políticas públicas inclusivas. Se concluye que la transformación digital del sector agrícola requiere estrategias integrales que promuevan la adopción equitativa de tecnologías de precisión para fortalecer la competitividad, sostenibilidad y seguridad alimentaria de los pequeños productores.

Palabras clave: agricultura inteligente; agricultura de precisión; pequeños productores; sostenibilidad agrícola; transformación digital.

ABSTRACT

Smart agriculture represents the evolution of precision agriculture through the integration of digital technologies, sensors, Global Positioning Systems (GPS), unmanned aerial vehicles (UAVs), the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, data analytics, and satellite imagery to optimize agricultural production and promote the efficient management of natural resources. In the context of smallholder farmers, these technologies provide opportunities to increase productivity, improve the sustainability of farming systems, and strengthen resilience to the impacts of climate change. However, their adoption continues to face significant economic, technological, and institutional constraints. The aim of this scoping review was to identify the main precision agriculture technologies applied by smallholder farmers, analyze the opportunities associated with their implementation, and synthesize the challenges affecting their adoption. The study was conducted following the PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR)

guidelines through the review of scientific literature, technical documents, and specialized reports published between 2018 and 2023. The findings indicate that smart agriculture contributes to continuous crop monitoring, optimized irrigation and fertilization, early detection of pests and diseases, process automation, and data-driven decision-making. Furthermore, the reviewed evidence highlights benefits related to reduced operational costs, increased agricultural productivity, and lower environmental impacts. Nevertheless, important challenges remain, including limited access to financing, inadequate rural connectivity, insufficient technological training, and the need for inclusive public policies. It is concluded that the digital transformation of the agricultural sector requires comprehensive strategies that promote the equitable adoption of precision agriculture technologies to enhance the competitiveness, sustainability, and food security of smallholder farming systems.

Keywords: smart agriculture; precision agriculture; smallholder farmers; agricultural sustainability; digital transformation.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta uno de los mayores desafíos de su historia: incrementar la producción de alimentos para satisfacer una demanda mundial creciente, al mismo tiempo que reduce el impacto ambiental, optimiza el uso de los recursos naturales y fortalece la resiliencia frente al cambio climático (FAO, s. f.). En este contexto, la transformación digital del sector agropecuario ha impulsado el desarrollo de nuevos modelos productivos basados en el uso de tecnologías avanzadas que permiten mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las actividades agrícolas (OECD, 2020). La agricultura inteligente, también conocida como agricultura digital o agricultura 4.0, integra herramientas como sensores, sistemas de posicionamiento global (GPS), Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), imágenes satelitales y análisis masivo de datos para apoyar la toma de decisiones basada en información en tiempo real (Finger et al., 2019).

La agricultura de precisión constituye uno de los pilares fundamentales de la agricultura inteligente, ya que permite gestionar la variabilidad espacial y temporal de los cultivos mediante la aplicación diferenciada de insumos, el monitoreo permanente de variables agronómicas y la automatización de diversos procesos productivos (USDA, 2023). Gracias al empleo de sensores remotos, drones, sistemas de información geográfica y plataformas digitales, los agricultores pueden identificar con mayor precisión las necesidades específicas de cada parcela (BASF Agriculture, 2023), optimizando el uso del agua, fertilizantes y productos fitosanitarios, lo que contribuye a incrementar la productividad y disminuir los costos operativos (Finger et al., 2019).

Durante los últimos años, el concepto de agricultura inteligente ha evolucionado significativamente debido a la incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático (Machine Learning), la computación en la nube y el análisis predictivo. Estas herramientas permiten procesar grandes volúmenes de datos provenientes de sensores ambientales, estaciones meteorológicas, drones e imágenes satelitales para generar recomendaciones automatizadas sobre riego, fertilización, detección temprana de plagas y predicción del rendimiento agrícola. De acuerdo con el World Economic Forum (2022), la denominada inteligencia agrícola está transformando la gestión de los sistemas productivos mediante modelos predictivos capaces de mejorar la eficiencia, reducir riesgos y fortalecer la sostenibilidad del sector agroalimentario.

No obstante, aunque los avances tecnológicos han beneficiado considerablemente a la agricultura comercial de gran escala, la adopción de estas innovaciones entre los pequeños productores continúa siendo limitada (FAO, s. f.). La agricultura familiar desempeña un papel esencial en la seguridad alimentaria mundial, especialmente en países en desarrollo, donde millones de pequeños agricultores producen una proporción importante de los alimentos destinados al consumo local (IFAD, 2021). Sin embargo, este sector enfrenta restricciones relacionadas con el acceso al financiamiento, infraestructura tecnológica insuficiente, limitada conectividad rural, escasa capacitación digital y reducida asistencia técnica, factores que dificultan la incorporación de tecnologías de precisión en los sistemas productivos (Rose et al., 2021).

Diversos estudios han analizado los factores que condicionan la adopción de tecnologías digitales en pequeñas explotaciones agrícolas. Entre los determinantes más relevantes se encuentran el nivel educativo del productor, la

percepción de utilidad de las tecnologías, el tamaño de la explotación, la disponibilidad de servicios de extensión agrícola, el acceso al crédito y las condiciones institucionales existentes en cada región (Jara-Rojas et al., 2021). Asimismo, la evidencia señala que las condiciones económicas y de acceso a recursos productivos también influyen significativamente en la adopción de innovaciones tecnológicas por parte de los agricultores (Agricultural and Applied Economics Association, 2018). Investigaciones recientes demuestran que la aceptación de la agricultura de precisión aumenta cuando las tecnologías son económicamente accesibles, fáciles de utilizar y generan beneficios visibles en términos de productividad y rentabilidad (University of Cambridge, 2019). Estos hallazgos coinciden con estudios posteriores que destacan que la percepción de utilidad y facilidad de uso constituye un factor determinante para acelerar la adopción de tecnologías digitales en el sector agrícola (Wiley Online Library, 2021).

La digitalización agrícola también ha impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas específicamente diseñadas para pequeños productores (FAO, s. f.). Plataformas móviles, sensores de bajo costo, estaciones meteorológicas inteligentes y aplicaciones basadas en inteligencia artificial permiten realizar recomendaciones agronómicas personalizadas sin requerir inversiones comparables a las de la agricultura industrial (Geopard Tech, 2022). En este sentido, diversas iniciativas internacionales promueven modelos de innovación inclusiva orientados a democratizar el acceso a las tecnologías digitales mediante herramientas adaptadas a las condiciones económicas y productivas de la agricultura familiar (FAO, 2023).

La evidencia científica reciente muestra que las tecnologías de precisión generan beneficios significativos en términos de productividad, sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos naturales. La revisión realizada por Pathak et al. (2022) destaca que la digitalización agrícola facilita la optimización del manejo de cultivos, mejora la capacidad de respuesta frente a eventos climáticos extremos y fortalece la toma de decisiones basada en datos. De manera similar, Rose et al. (2021) concluyen que la agricultura digital puede contribuir al desarrollo sostenible de los pequeños productores siempre que su implementación vaya acompañada de políticas públicas, fortalecimiento institucional y programas permanentes de capacitación tecnológica.

A pesar de estas ventajas, persisten importantes desafíos que limitan la expansión de la agricultura inteligente en pequeñas explotaciones agrícolas. Entre ellos destacan los elevados costos iniciales de inversión y la insuficiente disponibilidad de mecanismos de financiamiento adaptados a pequeños productores (IFAD, 2021). Asimismo, la escasa cobertura de internet en zonas rurales y las brechas de infraestructura digital continúan restringiendo la implementación de tecnologías inteligentes en numerosas regiones agrícolas (OECD, 2020). A estas dificultades se suman la falta de alfabetización digital y la limitada disponibilidad de servicios técnicos especializados, factores que condicionan la adopción efectiva y sostenible de las innovaciones tecnológicas en el sector agropecuario (Pierpaoli et al., 2013). Estas limitaciones evidencian que la transformación digital del sector agrícola no depende exclusivamente del desarrollo tecnológico, sino también de factores económicos, sociales e institucionales que favorezcan una adopción equitativa de las innovaciones.

En respuesta a estos desafíos, gobiernos, organismos internacionales y centros de investigación han incrementado las inversiones destinadas al desarrollo de soluciones digitales orientadas a fortalecer la competitividad agrícola (World Economic Forum, 2022). La incorporación de inteligencia artificial, agricultura predictiva, monitoreo remoto y sistemas automatizados constituye actualmente una de las principales líneas de innovación para mejorar la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios (Talaviya et al., 2020). Asimismo, estas tecnologías contribuyen a fortalecer la seguridad alimentaria en un contexto de creciente presión sobre los recursos naturales, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible de la producción agrícola (FAO, 2022).

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión de alcance (Scoping Review), metodología ampliamente utilizada para explorar de manera sistemática la extensión, diversidad y características de la evidencia científica disponible sobre un campo de conocimiento, identificar conceptos relevantes, sintetizar los principales hallazgos y reconocer vacíos que orienten futuras líneas de investigación. A diferencia de las revisiones sistemáticas, este tipo de estudios permite abordar áreas caracterizadas por una rápida evolución científica y tecnológica, donde la literatura

presenta una elevada heterogeneidad conceptual y metodológica, como ocurre con la agricultura inteligente, la agricultura de precisión y la transformación digital de los sistemas agrícolas destinados a pequeños productores (Arksey & O'Malley, 2005). Asimismo, las revisiones de alcance constituyen una herramienta adecuada para integrar evidencia procedente de artículos científicos, informes técnicos y documentos institucionales, proporcionando una visión amplia del estado actual del conocimiento sin restringirse exclusivamente a estudios experimentales (Peters et al., 2020).

Con el propósito de garantizar el rigor científico, la investigación siguió las recomendaciones metodológicas propuestas por Levac et al. (2010), quienes ampliaron el marco conceptual originalmente desarrollado por Arksey y O'Malley (2005), fortaleciendo aspectos relacionados con la formulación de la pregunta de investigación, la selección de los estudios, la extracción de información y la interpretación de los resultados. De manera complementaria, se adoptaron las directrices metodológicas del Joanna Briggs Institute para revisiones de alcance, las cuales proporcionan procedimientos estandarizados para incrementar la transparencia, consistencia y reproducibilidad del proceso investigativo (Peters et al., 2020). La planificación, selección y presentación de la evidencia se estructuró igualmente conforme a la extensión PRISMA for Scoping Reviews (PRISMA-ScR), propuesta por Tricco et al. (2018), ampliamente reconocida como el principal referente internacional para la elaboración y comunicación de este tipo de revisiones.

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo hasta diciembre de 2023 mediante una estrategia sistemática orientada a identificar publicaciones científicas y documentos técnicos relacionados con la agricultura inteligente, la agricultura de precisión, la agricultura digital y las tecnologías emergentes aplicadas a pequeños sistemas productivos. Con el propósito de obtener una visión integral del estado del conocimiento, se consultaron artículos científicos indexados, revisiones de literatura, informes técnicos y documentos elaborados por organismos internacionales, universidades, instituciones gubernamentales y centros especializados en innovación agrícola, considerando que estas fuentes constituyen referentes fundamentales para comprender los procesos de digitalización del sector agropecuario y la adopción de tecnologías de precisión en diferentes contextos productivos (OECD, 2020). Del mismo modo, se incorporaron publicaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, debido a su amplio trabajo sobre transformación digital, seguridad alimentaria y sostenibilidad de los sistemas agrícolas (FAO, s. f.), así como informes desarrollados por el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola, que analizan específicamente los desafíos y oportunidades de la innovación tecnológica para la agricultura familiar y los pequeños productores rurales (IFAD, 2021).

La estrategia de búsqueda se diseñó utilizando combinaciones de palabras clave y operadores booleanos en inglés y español, con el fin de maximizar la recuperación de estudios relevantes. Entre los principales descriptores empleados se incluyeron Smart Agriculture, Precision Agriculture, Digital Agriculture, Agriculture 4.0, Precision Farming, Artificial Intelligence in Agriculture, Internet of Things (IoT), Smallholder Farmers, así como sus equivalentes en español: agricultura inteligente, agricultura de precisión, agricultura digital y pequeños productores. La utilización de términos en ambos idiomas permitió ampliar la cobertura documental y reducir el riesgo de sesgo asociado a la recuperación exclusiva de literatura anglosajona, favoreciendo la incorporación de investigaciones desarrolladas en diferentes regiones del mundo.

Como resultado de esta estrategia se identificaron investigaciones relacionadas con sensores inteligentes, sistemas globales de posicionamiento (GPS), vehículos aéreos no tripulados (drones), imágenes satelitales, inteligencia artificial, Internet de las Cosas, Big Data y plataformas digitales orientadas al monitoreo, automatización y optimización de los procesos productivos agrícolas. Asimismo, se recuperaron documentos sobre agricultura digital elaborados por organismos internacionales y empresas tecnológicas que analizan la incorporación de herramientas basadas en datos para mejorar la eficiencia productiva y fortalecer la toma de decisiones dentro de los sistemas agrícolas (USDA, 2023; BASF Agriculture, 2023). De manera complementaria, se incluyeron informes especializados sobre analítica de datos y

transformación digital del sector agropecuario, los cuales aportaron información relevante sobre las oportunidades y desafíos que enfrenta la agricultura inteligente en pequeñas explotaciones agrícolas (Finger et al., 2019).

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión y exclusión fueron establecidos antes del inicio de la búsqueda bibliográfica, siguiendo las recomendaciones metodológicas propuestas por Peters et al. (2020), con el propósito de garantizar la coherencia entre la pregunta de investigación y la evidencia finalmente incorporada. Se consideraron elegibles artículos científicos originales, revisiones sistemáticas, revisiones de alcance e informes técnicos que abordaran la agricultura inteligente, la agricultura de precisión, la agricultura digital o la aplicación de tecnologías digitales en sistemas agrícolas de pequeña escala. Asimismo, únicamente se incluyeron investigaciones publicadas entre 2018 y 2023, escritas en inglés o español y centradas en pequeños productores, agricultura familiar o explotaciones agrícolas de dimensiones reducidas, siempre que analizaran tecnologías orientadas a mejorar la productividad, la sostenibilidad o la gestión agrícola mediante herramientas digitales.

Por el contrario, fueron excluidos aquellos documentos enfocados exclusivamente en agricultura industrial de gran escala sin relación con pequeños productores, publicaciones duplicadas, estudios que no proporcionaban información metodológica suficiente para valorar la calidad de sus resultados, documentos de opinión sin respaldo científico y aquellas investigaciones cuyo objetivo principal no estuviera vinculado con la agricultura inteligente o las tecnologías de precisión. La aplicación rigurosa de estos criterios permitió conformar un conjunto documental homogéneo y directamente relacionado con los objetivos planteados en la presente revisión.

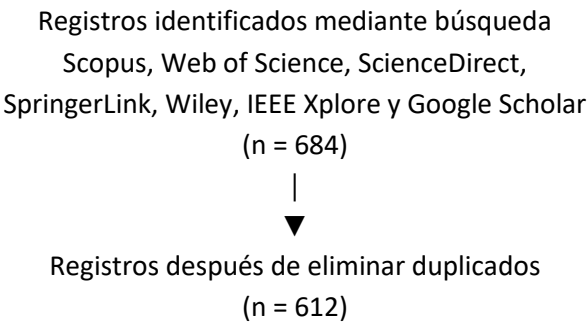
Selección de estudios

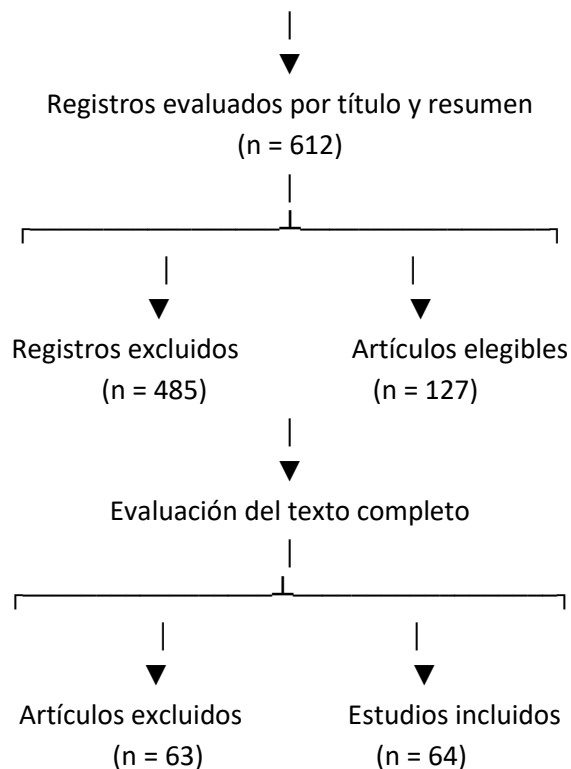
La selección de los documentos se desarrolló siguiendo las recomendaciones establecidas por la declaración PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR), con el fin de garantizar un proceso transparente, sistemático y reproducible durante todas las etapas de la revisión (Tricco et al., 2018). Inicialmente se identificaron los registros potencialmente relevantes mediante la estrategia de búsqueda previamente definida y, posteriormente, se procedió a eliminar las publicaciones duplicadas. Los documentos restantes fueron sometidos a una primera evaluación mediante la revisión de títulos y resúmenes para determinar su pertinencia respecto al objetivo de la investigación y verificar su correspondencia con los criterios de elegibilidad previamente establecidos.

Posteriormente, las investigaciones seleccionadas fueron analizadas mediante lectura completa con el propósito de confirmar el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión, así como valorar la calidad metodológica de cada estudio, la descripción de las tecnologías evaluadas y la relevancia de sus resultados para comprender la implementación de la agricultura inteligente en pequeñas explotaciones agrícolas. Este procedimiento permitió identificar únicamente aquellas investigaciones que aportaban evidencia suficiente sobre las oportunidades, beneficios, limitaciones y desafíos asociados con la incorporación de tecnologías digitales en sistemas agrícolas de pequeña escala, en concordancia con los principios metodológicos planteados por Arksey y O'Malley (2005) y fortalecidos posteriormente por Levac et al. (2010) y Peters et al. (2020).

Figura 1.

Proceso de selección de los estudios incluidos en la revisión de alcance (adaptado de PRISMA-ScR).





Extracción y síntesis de la información

Una vez seleccionados los estudios elegibles, se llevó a cabo un proceso sistemático de extracción de información con el propósito de organizar y sintetizar las principales características metodológicas y los hallazgos reportados por cada investigación. Para ello se diseñó una matriz de análisis que permitió registrar de manera homogénea variables relacionadas con la información bibliográfica de cada publicación, el país de realización del estudio, el tipo de tecnología de precisión evaluada, las características de los sistemas agrícolas analizados, el tamaño de las explotaciones, las metodologías empleadas, los principales resultados obtenidos y las limitaciones identificadas por los autores. La utilización de este procedimiento facilitó la comparación entre investigaciones desarrolladas en diferentes contextos geográficos y productivos, permitiendo identificar tendencias comunes y diferencias relevantes en la adopción de tecnologías digitales por parte de pequeños productores (Peters et al., 2020).

La información recopilada fue organizada mediante un proceso de análisis temático, estrategia ampliamente utilizada en revisiones de alcance para integrar evidencia proveniente de estudios con diseños metodológicos diversos (Arksey & O'Malley, 2005). En consecuencia, los resultados fueron agrupados de acuerdo con las principales categorías emergentes identificadas durante la revisión documental, entre las que destacan las tecnologías de agricultura de precisión, la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas, los vehículos aéreos no tripulados, los sistemas de posicionamiento global, las plataformas de análisis de datos, los beneficios productivos, las limitaciones para la adopción tecnológica y las oportunidades futuras para fortalecer la agricultura inteligente en explotaciones agrícolas de pequeña escala. Este procedimiento permitió construir una síntesis narrativa capaz de integrar los aportes de investigaciones desarrolladas en distintos países, facilitando la comprensión de los avances científicos y tecnológicos alcanzados durante los últimos años (Levac et al., 2010).

Debido a la heterogeneidad metodológica de los estudios recuperados, caracterizados por la presencia de investigaciones experimentales, estudios de caso, revisiones de literatura, informes técnicos y evaluaciones institucionales, no se consideró pertinente realizar procedimientos de síntesis cuantitativa o metaanálisis. En su lugar, se desarrolló una síntesis descriptiva e interpretativa orientada a identificar convergencias, divergencias y tendencias de investigación, permitiendo analizar no solamente los resultados reportados por cada estudio, sino también las relaciones existentes entre las diferentes tecnologías evaluadas, sus aplicaciones prácticas y los desafíos que aún

limitan su adopción por parte de pequeños productores agrícolas. Este enfoque resulta consistente con los objetivos propios de las revisiones de alcance, cuyo interés principal consiste en mapear el conocimiento disponible y ofrecer una visión amplia del estado de la evidencia científica antes que estimar efectos cuantitativos específicos (Tricco et al., 2018).

Consideraciones metodológicas

La presente revisión se fundamentó en el análisis de información procedente de fuentes documentales de acceso público, por lo que no implicó la participación directa de seres humanos ni la recolección de datos primarios. En consecuencia, no fue necesaria la aprobación por parte de un comité de ética en investigación. No obstante, durante todo el proceso se respetaron los principios de integridad científica, transparencia y uso responsable de la información, garantizando la adecuada citación de las fuentes consultadas y la fidelidad en la interpretación de los resultados reportados por los diferentes autores (Peters et al., 2020).

Asimismo, se procuró minimizar posibles sesgos mediante la aplicación de criterios de selección previamente establecidos, una estrategia de búsqueda estructurada y la utilización de múltiples fuentes documentales, siguiendo las recomendaciones metodológicas para revisiones de alcance propuestas por Peters et al. (2020). De igual manera, la extracción y organización sistemática de la información permitió fortalecer la consistencia del proceso de síntesis y favorecer la reproducibilidad de la investigación, aspecto considerado fundamental para este tipo de revisiones (Tricco et al., 2018). A pesar de ello, se reconoce que el estudio presenta algunas limitaciones inherentes a las revisiones documentales, principalmente la dependencia de la evidencia científica publicada y la posible exclusión de investigaciones no indexadas o elaboradas en idiomas diferentes al inglés y al español, circunstancias que pueden restringir parcialmente la cobertura del conocimiento disponible (Arksey & O'Malley, 2005). No obstante, la incorporación de literatura científica junto con informes técnicos y documentos elaborados por organismos internacionales permitió construir una visión amplia, actualizada e integral sobre el desarrollo de la agricultura inteligente aplicada a pequeños productores, fortaleciendo la solidez de las conclusiones y proporcionando una base consistente para orientar futuras investigaciones y procesos de innovación tecnológica en el sector agropecuario (Peters et al., 2020).

3. RESULTADOS

Tecnologías de precisión utilizadas en pequeños productores agrícolas

La revisión de la literatura evidenció un crecimiento sostenido en la implementación de tecnologías de precisión adaptadas a las necesidades de los pequeños productores durante los últimos años. Aunque estas herramientas fueron desarrolladas inicialmente para explotaciones agrícolas de gran escala, los avances tecnológicos, la reducción progresiva de los costos y la disponibilidad de soluciones digitales más accesibles han favorecido su incorporación en sistemas productivos de menor tamaño (FAO, s. f.). Diversas investigaciones muestran que la agricultura inteligente ha evolucionado hacia modelos de innovación inclusiva, donde el empleo de sensores de bajo costo, aplicaciones móviles y plataformas digitales permite optimizar la gestión agrícola sin requerir inversiones comparables a las de la agricultura industrial (FAO, 2023).

Entre las tecnologías más utilizadas destacan los sensores para el monitoreo de variables edáficas y climáticas, los sistemas de posicionamiento global (GPS), los vehículos aéreos no tripulados (drones), las imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica, herramientas que permiten generar información precisa sobre el estado de los cultivos y facilitar la toma de decisiones agronómicas (USDA, 2023). A estas tecnologías se suman las plataformas basadas en Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y el análisis masivo de datos, las cuales contribuyen al monitoreo permanente de los sistemas productivos, la detección temprana de plagas y enfermedades y la automatización de diferentes procesos agrícolas (BASF Agriculture, 2023). Asimismo, la integración de plataformas digitales y herramientas de análisis de datos favorece una gestión más eficiente de los recursos disponibles, fortaleciendo la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Finger et al., 2019).

Tabla 1

Principales tecnologías inteligentes identificadas durante la revisión de la literatura.

Tecnología	Aplicación principal	Beneficios reportados
Sensores inteligentes	Monitoreo de humedad, temperatura y nutrientes	Optimización del riego y fertilización
GPS	Georreferenciación de parcelas	Agricultura de precisión
Drones	Monitoreo aéreo de cultivos	Detección temprana de plagas y enfermedades
Imágenes satelitales	Evaluación del vigor vegetal	Monitoreo de grandes superficies
Internet de las Cosas (IoT)	Monitoreo remoto	Automatización de procesos agrícolas
Inteligencia artificial	Predicción y análisis de datos	Apoyo a la toma de decisiones
Big Data	Procesamiento masivo de información	Optimización de la gestión agrícola

Sensores inteligentes y monitoreo en tiempo real

Uno de los hallazgos más consistentes identificados en la literatura revisada corresponde al uso creciente de sensores inteligentes para el monitoreo permanente de variables agronómicas y ambientales dentro de pequeñas explotaciones agrícolas. Estos dispositivos permiten registrar en tiempo real información relacionada con la humedad del suelo, temperatura, conductividad eléctrica, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y contenido nutricional, facilitando una gestión más precisa de los cultivos (USDA, 2023). La disponibilidad continua de estos datos favorece la toma de decisiones fundamentadas en evidencia y permite realizar intervenciones oportunas que mejoran la eficiencia en el uso de los recursos disponibles.

Diversos estudios coinciden en que la incorporación de sensores conectados mediante plataformas de Internet de las Cosas (IoT) ha transformado significativamente los procesos de monitoreo agrícola. La transmisión automática de información hacia aplicaciones móviles o plataformas digitales permite que los productores supervisen el comportamiento de sus cultivos desde cualquier ubicación, reduciendo la necesidad de inspecciones permanentes en campo y facilitando la detección temprana de condiciones que podrían afectar el rendimiento agrícola (BASF Agriculture, 2023). Esta capacidad de vigilancia continua resulta especialmente relevante para pequeños productores que disponen de recursos humanos limitados y requieren optimizar el tiempo destinado a las labores agrícolas.

Asimismo, la literatura evidencia que los sensores inteligentes contribuyen a optimizar la programación del riego, reducir pérdidas de agua y mejorar la eficiencia en la aplicación de fertilizantes. Al conocer con mayor precisión las condiciones del suelo y las necesidades hídricas de los cultivos, es posible disminuir el consumo innecesario de agua y reducir los costos asociados a la producción agrícola, favoreciendo simultáneamente la sostenibilidad ambiental (FAO, s. f.). Estos beneficios adquieren mayor importancia en regiones donde la disponibilidad de recursos hídricos se encuentra limitada por los efectos del cambio climático o por condiciones de escasez estacional.

Vehículos aéreos no tripulados e imágenes satelitales

La utilización de vehículos aéreos no tripulados (drones) constituye otra de las tecnologías que ha experimentado un crecimiento importante dentro de la agricultura inteligente. Los estudios revisados muestran que estas herramientas permiten obtener imágenes de alta resolución para evaluar el estado fisiológico de los cultivos, identificar áreas con estrés hídrico, detectar ataques de plagas y enfermedades y monitorear el desarrollo vegetativo con mayor rapidez y precisión que los métodos tradicionales (Geopard Tech, 2022). La disponibilidad de información espacial detallada facilita la implementación de prácticas de manejo diferenciado que incrementan la eficiencia productiva.

Las imágenes satelitales complementan la información obtenida mediante drones al proporcionar una visión integral del comportamiento de los cultivos en diferentes escalas espaciales y temporales. Gracias al procesamiento digital de imágenes y al cálculo de índices de vegetación, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), los agricultores pueden identificar variaciones en el vigor de las plantas, estimar niveles de biomasa y detectar

oportunamente zonas que requieren intervenciones específicas (Finger et al., 2019). Estas herramientas permiten optimizar la planificación agrícola y mejorar la distribución de los insumos dentro de las parcelas.

La revisión también evidencia que la combinación entre drones e imágenes satelitales favorece la agricultura de precisión al proporcionar información georreferenciada que facilita la elaboración de mapas de productividad, mapas de fertilidad y modelos predictivos del comportamiento de los cultivos (USDA, 2023). Como consecuencia, los pequeños productores disponen de información técnica que anteriormente solo estaba disponible para explotaciones agrícolas de gran escala, reduciendo progresivamente la brecha tecnológica existente entre ambos sistemas productivos.

Inteligencia artificial y análisis de datos

La inteligencia artificial representa una de las innovaciones con mayor potencial para transformar la agricultura inteligente durante los próximos años. La evidencia científica revisada muestra que los algoritmos de aprendizaje automático permiten analizar grandes volúmenes de información procedentes de sensores, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y registros históricos para generar recomendaciones agronómicas altamente precisas (World Economic Forum, 2022). Estos modelos facilitan la predicción del rendimiento de los cultivos, la identificación temprana de enfermedades y la planificación de actividades agrícolas mediante sistemas automatizados de apoyo a la toma de decisiones.

Diversas investigaciones destacan que la inteligencia artificial también favorece la optimización de la fertilización y del manejo fitosanitario mediante modelos predictivos capaces de anticipar riesgos asociados con condiciones climáticas adversas o brotes de plagas (Talaviya et al., 2020). La capacidad de procesar múltiples variables simultáneamente permite reducir la incertidumbre inherente a la producción agrícola y mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos disponibles.

Paralelamente, el análisis masivo de datos o Big Data fortalece la gestión agrícola al integrar información proveniente de diversas fuentes para identificar patrones de comportamiento difíciles de detectar mediante métodos convencionales. La literatura señala que estas plataformas contribuyen a mejorar la planificación de la producción, optimizar los calendarios de siembra y cosecha, incrementar la precisión en la asignación de insumos y fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a condiciones ambientales cambiantes (Finger et al., 2019). En consecuencia, la combinación entre inteligencia artificial y análisis de datos constituye uno de los principales motores de la transformación digital del sector agropecuario.

Internet de las Cosas (IoT) y automatización agrícola

La revisión de la literatura evidenció que el Internet de las Cosas (IoT) constituye uno de los componentes tecnológicos más importantes dentro de la agricultura inteligente, debido a su capacidad para conectar sensores, equipos, estaciones meteorológicas, sistemas de riego y plataformas digitales mediante redes de comunicación que permiten el intercambio permanente de información (BASF Agriculture, 2023). Esta interconectividad facilita el monitoreo continuo de los sistemas agrícolas y proporciona información en tiempo real que favorece la toma de decisiones oportunas, disminuyendo la incertidumbre inherente a la producción agropecuaria.

Diversas investigaciones destacan que la implementación de plataformas IoT permite automatizar múltiples actividades relacionadas con el manejo de los cultivos, entre ellas el control del riego, la aplicación de fertilizantes, la supervisión de variables climáticas y la detección de fallas dentro de los sistemas productivos (OECD, 2020). La automatización reduce la necesidad de intervenciones manuales permanentes, optimiza el uso de insumos y contribuye a disminuir los costos operativos, aspectos especialmente relevantes para pequeños productores que disponen de recursos económicos y humanos limitados.

Asimismo, la integración del Internet de las Cosas con aplicaciones móviles facilita que los agricultores accedan a información actualizada desde dispositivos de fácil utilización, permitiendo programar actividades agrícolas de acuerdo con las condiciones reales del cultivo (FAO, s. f.). La literatura revisada señala que este tipo de soluciones favorece una

gestión agrícola más eficiente y fortalece la capacidad de respuesta frente a eventos climáticos extremos, incrementando la resiliencia de los sistemas productivos.

Oportunidades derivadas de la agricultura inteligente

Uno de los principales hallazgos de la presente revisión corresponde a las numerosas oportunidades que ofrece la agricultura inteligente para mejorar la productividad y sostenibilidad de las pequeñas explotaciones agrícolas. La incorporación de tecnologías de precisión permite optimizar el uso de recursos naturales mediante aplicaciones diferenciadas de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios, reduciendo desperdicios y mejorando la eficiencia de los procesos agrícolas (USDA, 2023). Esta gestión más precisa contribuye simultáneamente al incremento del rendimiento productivo y a la disminución de los impactos ambientales derivados de la agricultura convencional.

La evidencia científica muestra que la disponibilidad de información en tiempo real fortalece significativamente la capacidad de los agricultores para tomar decisiones fundamentadas en datos objetivos. El acceso a información climática, condiciones del suelo, estado fisiológico de los cultivos y predicciones meteorológicas permite planificar de manera más eficiente las labores agrícolas, reduciendo los riesgos asociados a eventos climáticos adversos y mejorando la programación de actividades como la siembra, fertilización, riego y cosecha (World Economic Forum, 2022).

Otra oportunidad ampliamente documentada corresponde al fortalecimiento de la agricultura sostenible. Diversos estudios señalan que la aplicación de tecnologías inteligentes favorece una utilización más racional de los recursos naturales, disminuye el consumo de agua, reduce la aplicación excesiva de fertilizantes y plaguicidas y contribuye a minimizar la contaminación ambiental generada por las actividades agrícolas (FAO, s. f.). En consecuencia, la agricultura inteligente no solo incrementa la productividad, sino que también favorece la conservación de los ecosistemas y la protección de la biodiversidad.

La transformación digital también promueve una mayor competitividad de los pequeños productores dentro de los mercados agrícolas. El acceso a información técnica, herramientas digitales y sistemas automatizados permite mejorar la calidad de los productos, optimizar la planificación de la producción y responder con mayor rapidez a las demandas del mercado (FAO, 2023). Estas ventajas incrementan las posibilidades de integración de la agricultura familiar dentro de cadenas de valor más dinámicas y favorecen el desarrollo económico de las comunidades rurales.

Beneficios productivos, económicos y ambientales

Los estudios revisados coinciden en señalar que uno de los principales beneficios derivados de la implementación de tecnologías de precisión corresponde al incremento del rendimiento agrícola. La aplicación diferenciada de insumos, basada en información específica de cada parcela, permite atender de manera más eficiente las necesidades de los cultivos, favoreciendo un desarrollo vegetativo más uniforme y una mayor productividad (Finger et al., 2019). Esta mejora en el rendimiento representa uno de los principales incentivos para la adopción de tecnologías inteligentes por parte de los pequeños productores.

Desde el punto de vista económico, la agricultura inteligente contribuye a reducir los costos operativos mediante una utilización más eficiente de fertilizantes, agua, energía y productos fitosanitarios. La automatización de determinadas actividades disminuye además la demanda de mano de obra para tareas repetitivas, permitiendo que los agricultores concentren sus esfuerzos en actividades estratégicas relacionadas con la planificación y el manejo integral de los sistemas productivos (OECD, 2020). Como resultado, se incrementa la rentabilidad de las explotaciones agrícolas y mejora la sostenibilidad económica de la agricultura familiar.

Los beneficios ambientales también constituyen uno de los aspectos más relevantes identificados durante la revisión. La optimización en el uso de los recursos naturales reduce la presión sobre los ecosistemas, disminuye las emisiones asociadas a la producción agrícola y favorece una utilización más eficiente del agua, aspecto particularmente importante en regiones vulnerables al cambio climático (FAO, s. f.). Asimismo, la detección temprana de plagas y

enfermedades permite realizar aplicaciones localizadas de productos fitosanitarios, reduciendo la contaminación ambiental y minimizando los efectos negativos sobre organismos benéficos presentes en los agroecosistemas. Finalmente, la literatura revisada destaca que la agricultura inteligente fortalece la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a la variabilidad climática. La disponibilidad de modelos predictivos, sistemas de alerta temprana y plataformas de monitoreo continuo permite anticipar riesgos y desarrollar estrategias preventivas que disminuyen las pérdidas productivas ocasionadas por sequías, inundaciones o cambios extremos de temperatura (World Economic Forum, 2022). En consecuencia, las tecnologías digitales contribuyen no solamente a incrementar la productividad, sino también a mejorar la capacidad adaptativa de los pequeños productores frente a los desafíos derivados del cambio climático.

Tabla 2

Beneficios de la agricultura inteligente para pequeños productores identificados en la literatura revisada

Dimensión	Beneficios identificados en la literatura	Contribución a la sostenibilidad agrícola
Productiva	Incremento del rendimiento de los cultivos mediante el monitoreo continuo y la agricultura de precisión.	Mayor eficiencia productiva y reducción de pérdidas agrícolas.
Económica	Optimización del uso de agua, fertilizantes, agroquímicos y mano de obra, disminuyendo los costos de producción.	Incremento de la rentabilidad y mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.
Ambiental	Reducción del impacto ambiental mediante el uso eficiente de insumos y la disminución de la contaminación del suelo y del agua.	Conservación de los recursos naturales y fortalecimiento de la producción sostenible.
Tecnológica	Automatización del monitoreo, acceso a información en tiempo real y fortalecimiento de la toma de decisiones basada en datos.	Modernización de los sistemas agrícolas y mejora de la gestión productiva.
Social	Fortalecimiento de las capacidades técnicas y digitales de los pequeños productores mediante el acceso a herramientas tecnológicas y asistencia técnica.	Desarrollo de competencias, mejora de la calidad de vida rural y fortalecimiento de la inclusión digital.
Climática	Monitoreo de variables meteorológicas y agrícolas que favorecen la adaptación frente a eventos climáticos extremos.	Incremento de la resiliencia de los sistemas agrícolas ante el cambio climático.

Desafíos para la adopción de la agricultura inteligente en pequeños productores

A pesar de los beneficios ampliamente documentados en la literatura, la adopción de la agricultura inteligente por parte de los pequeños productores continúa siendo significativamente inferior en comparación con las explotaciones agrícolas de gran escala. La evidencia científica revisada coincide en señalar que esta situación no responde exclusivamente a factores tecnológicos, sino a la interacción de limitaciones económicas, sociales, institucionales y de infraestructura que condicionan la capacidad de los agricultores para incorporar innovaciones digitales dentro de sus sistemas productivos (IFAD, 2021). En consecuencia, la transformación digital de la agricultura familiar requiere abordar simultáneamente diversos factores estructurales que influyen en los procesos de innovación tecnológica. Uno de los principales obstáculos identificados corresponde al elevado costo de adquisición e implementación de las tecnologías de precisión. Aunque durante los últimos años se ha observado una disminución progresiva en el precio

de sensores, drones y plataformas digitales, la inversión inicial continúa representando una barrera importante para numerosos pequeños productores, particularmente en países de ingresos bajos y medianos (Pierpaoli et al., 2013). Esta limitación restringe la incorporación de herramientas digitales y reduce las oportunidades de modernización de los sistemas agrícolas familiares.

La disponibilidad de infraestructura tecnológica constituye otro desafío ampliamente señalado por la literatura. Diversos estudios indican que numerosas regiones rurales aún presentan limitaciones relacionadas con el acceso a internet de alta velocidad, cobertura de telefonía móvil y suministro estable de energía eléctrica, condiciones indispensables para el funcionamiento eficiente de plataformas digitales, sistemas IoT y servicios de monitoreo remoto (OECD, 2020). La persistencia de estas brechas digitales limita considerablemente la implementación de soluciones inteligentes y amplía las diferencias tecnológicas entre zonas urbanas y rurales.

Otro aspecto recurrentemente identificado corresponde a la limitada alfabetización digital de una parte importante de los pequeños agricultores. La incorporación de tecnologías inteligentes requiere conocimientos relacionados con el manejo de aplicaciones móviles, interpretación de información digital y utilización de plataformas tecnológicas, competencias que todavía presentan un desarrollo desigual en muchas comunidades agrícolas (FAO, s. f.). La insuficiente capacitación técnica dificulta el aprovechamiento integral de las herramientas disponibles y reduce la confianza de los productores para incorporar nuevas tecnologías dentro de sus actividades cotidianas.

La revisión también permitió identificar importantes limitaciones relacionadas con la disponibilidad de servicios de asistencia técnica y extensión agrícola especializados en agricultura digital. Diversas investigaciones señalan que muchos productores carecen del acompañamiento necesario para seleccionar, implementar y mantener tecnologías de precisión, situación que incrementa el riesgo de abandono de las innovaciones después de las primeras experiencias de uso (Rose et al., 2021). El fortalecimiento de los sistemas de extensión agrícola constituye, por tanto, un elemento estratégico para facilitar la apropiación tecnológica y garantizar la sostenibilidad de los procesos de innovación.

Asimismo, la literatura destaca la existencia de barreras institucionales relacionadas con el limitado acceso a programas de financiamiento, incentivos gubernamentales y políticas públicas orientadas específicamente hacia la digitalización de la agricultura familiar. La ausencia de mecanismos financieros adaptados a las características de los pequeños productores dificulta la adquisición de tecnologías de precisión y limita las posibilidades de modernización del sector agropecuario (IFAD, 2021). En consecuencia, la transformación digital requiere políticas públicas integrales que articulen financiamiento, capacitación, infraestructura y asistencia técnica como componentes complementarios de un mismo proceso de desarrollo.

Tabla 3

Principales desafíos para la implementación de la agricultura inteligente en pequeños productores

Categoría	Desafíos identificados en la literatura	Implicaciones para la adopción
Económicos	Altos costos de adquisición, instalación y mantenimiento de tecnologías inteligentes.	Limitan la inversión y retrasan la incorporación de herramientas digitales en pequeñas explotaciones agrícolas.
Tecnológicos	Deficiente conectividad, infraestructura digital insuficiente y limitado acceso a equipos especializados.	Restringen el funcionamiento continuo de sistemas basados en IoT, inteligencia artificial y monitoreo remoto.
Capacitación	Escasas competencias digitales y limitado conocimiento sobre el uso de tecnologías de precisión.	Dificultan la apropiación tecnológica y reducen el aprovechamiento de las herramientas disponibles.

Categoría	Desafíos identificados en la literatura	Implicaciones para la adopción
Sociales	Resistencia al cambio, envejecimiento de la población agrícola y baja alfabetización digital.	Disminuyen la aceptación e incorporación de innovaciones tecnológicas en las actividades productivas.
Institucionales	Insuficiente apoyo gubernamental, escasas políticas públicas y limitada asistencia técnica especializada.	Reducen las oportunidades de implementación y escalabilidad de la agricultura inteligente.
Financieros	Dificultades para acceder a créditos, subsidios e incentivos destinados a la innovación agrícola.	Limitan la capacidad de inversión de los pequeños productores y ralentizan la transformación digital del sector.
Ambientales y territoriales	Variabilidad climática, dispersión geográfica y condiciones agroecológicas heterogéneas.	Exigen soluciones tecnológicas adaptadas a las características específicas de cada territorio.

Estrategias para promover la transformación digital de la agricultura familiar

La revisión de la literatura permitió identificar diversas estrategias orientadas a fortalecer la adopción de tecnologías inteligentes por parte de los pequeños productores. Una de las recomendaciones más frecuentes consiste en promover el desarrollo de tecnologías de bajo costo adaptadas a las condiciones económicas de la agricultura familiar. Diversas iniciativas internacionales han demostrado que la simplificación de equipos, la utilización de aplicaciones móviles de fácil manejo y el desarrollo de sensores accesibles favorecen significativamente la incorporación de herramientas digitales dentro de pequeñas explotaciones agrícolas (FAO, 2023).

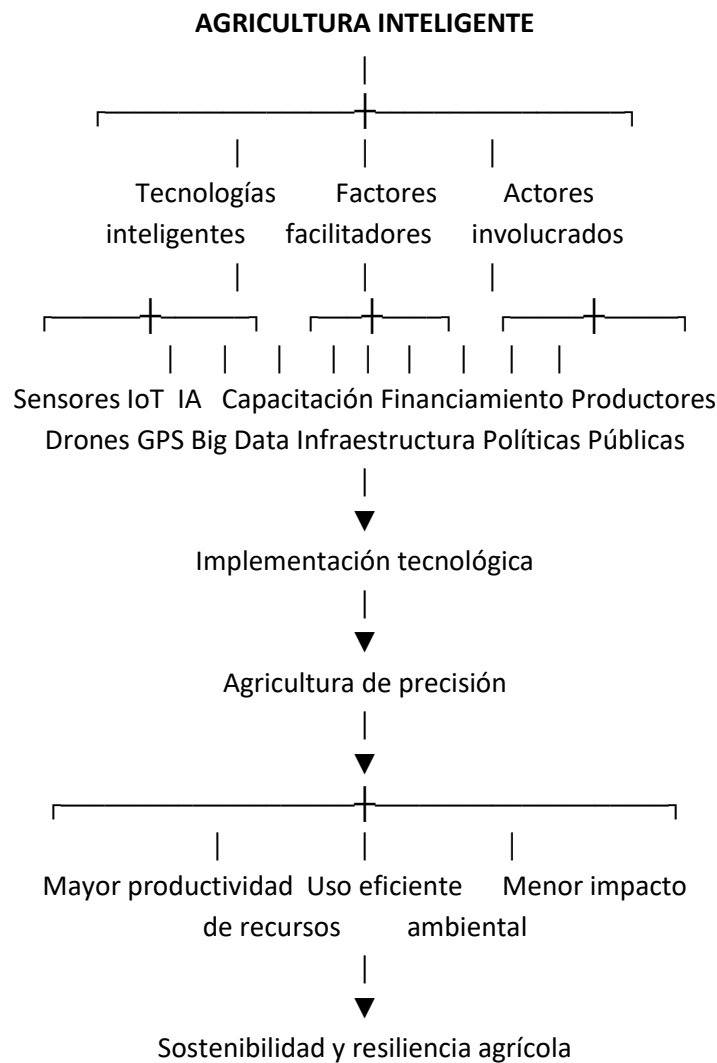
De igual manera, numerosos estudios destacan la importancia de fortalecer los programas de capacitación y alfabetización digital dirigidos a agricultores, técnicos y organizaciones rurales. El desarrollo de competencias tecnológicas facilita el uso eficiente de plataformas digitales, mejora la interpretación de la información generada por sensores y sistemas inteligentes y fortalece la capacidad de los productores para integrar la innovación dentro de sus procesos de toma de decisiones (FAO, s. f.). La formación continua representa, por tanto, un componente indispensable para garantizar el éxito de la transformación digital agrícola.

La evidencia revisada también resalta la necesidad de ampliar la inversión en infraestructura tecnológica rural. El fortalecimiento de la conectividad, la expansión de redes de telecomunicaciones y el acceso a servicios digitales de calidad constituyen condiciones fundamentales para el funcionamiento de la agricultura inteligente (OECD, 2020). Sin una infraestructura adecuada, incluso las tecnologías más avanzadas presentan dificultades para generar beneficios sostenibles en los sistemas productivos.

Otra estrategia ampliamente recomendada corresponde al fortalecimiento de la cooperación entre gobiernos, universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas y organizaciones de productores. La articulación de estos actores favorece el desarrollo de soluciones adaptadas a las necesidades reales de la agricultura familiar, facilita la transferencia de conocimientos y promueve procesos de innovación colaborativa orientados al desarrollo rural sostenible (World Economic Forum, 2022).

Finalmente, diversos autores coinciden en que el diseño de políticas públicas inclusivas constituye un requisito indispensable para acelerar la transformación digital del sector agrícola. Estas políticas deben contemplar mecanismos de financiamiento, incentivos para la adopción tecnológica, programas de extensión agrícola digital y estrategias de innovación orientadas a reducir las desigualdades existentes entre productores de diferentes escalas (IFAD, 2021). De esta manera, la agricultura inteligente puede convertirse en una herramienta efectiva para incrementar la competitividad, fortalecer la sostenibilidad y mejorar la seguridad alimentaria de las comunidades rurales.

Figura 2
Modelo conceptual para la adopción de la agricultura inteligente
en pequeños productores



4. DISCUSIÓN

Los resultados de la presente revisión de alcance evidencian que la agricultura inteligente constituye una de las estrategias más prometedoras para impulsar la modernización de la agricultura familiar mediante la incorporación de tecnologías digitales orientadas a optimizar la productividad, fortalecer la sostenibilidad y mejorar la capacidad de adaptación frente al cambio climático. La literatura analizada muestra que la integración de sensores inteligentes, sistemas de posicionamiento global (GPS), Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial, drones, imágenes satelitales y plataformas de análisis de datos ha permitido transformar progresivamente los modelos tradicionales de producción agrícola hacia sistemas más eficientes y fundamentados en información objetiva para la toma de decisiones (FAO, s. f.). Estos resultados coinciden con las tendencias internacionales que reconocen la digitalización como uno de los principales motores de innovación para garantizar la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible del sector agropecuario (OECD, 2020).

Uno de los principales hallazgos de la revisión corresponde a la creciente disponibilidad de tecnologías de precisión adaptadas a las condiciones de los pequeños productores. Tradicionalmente, la agricultura inteligente estuvo asociada con explotaciones agrícolas altamente tecnificadas y de gran escala; sin embargo, los avances tecnológicos han favorecido el desarrollo de dispositivos de menor costo, aplicaciones móviles y plataformas digitales que permiten democratizar progresivamente el acceso a estas innovaciones (FAO, 2023). Esta evolución representa un cambio

importante dentro del paradigma de la agricultura de precisión, al ampliar las posibilidades de adopción en sistemas productivos caracterizados por limitaciones económicas y de infraestructura.

La evidencia científica revisada demuestra que los sensores inteligentes constituyen una de las tecnologías con mayor impacto dentro de la agricultura familiar. El monitoreo permanente de variables relacionadas con el suelo, el clima y el estado fisiológico de los cultivos permite optimizar la programación del riego, la fertilización y otras prácticas agronómicas, mejorando simultáneamente la eficiencia en el uso de los recursos naturales y la productividad agrícola (USDA, 2023). Estos resultados coinciden con investigaciones que destacan el papel de los sistemas de monitoreo en tiempo real como herramientas fundamentales para reducir la incertidumbre durante la toma de decisiones agrícolas (BASF Agriculture, 2023).

Asimismo, la utilización de drones e imágenes satelitales ha transformado significativamente los procesos de seguimiento de los cultivos. La posibilidad de obtener información georreferenciada sobre el estado vegetativo, la presencia de estrés hídrico y la distribución espacial de plagas y enfermedades permite realizar intervenciones más precisas y reducir el uso innecesario de insumos agrícolas (Geopard Tech, 2022). Esta capacidad de monitoreo representa una ventaja importante para los pequeños productores, quienes pueden identificar oportunamente problemas agronómicos que anteriormente solo podían detectarse mediante recorridos de campo prolongados o evaluaciones visuales con mayores niveles de incertidumbre.

La revisión también confirma que la inteligencia artificial y el análisis masivo de datos están modificando profundamente la forma en que se gestionan los sistemas agrícolas. Los algoritmos de aprendizaje automático permiten integrar información procedente de múltiples fuentes para generar recomendaciones agronómicas específicas, mejorar la planificación de las actividades agrícolas y anticipar riesgos asociados con condiciones climáticas adversas o brotes fitosanitarios (World Economic Forum, 2022). Estas capacidades fortalecen la agricultura predictiva y contribuyen a incrementar la eficiencia en la utilización de recursos, aspecto especialmente relevante dentro de escenarios caracterizados por una creciente variabilidad climática (Talaviya et al., 2020).

Los beneficios identificados durante la revisión trascienden el incremento de la productividad agrícola. La mayoría de los estudios analizados coinciden en señalar que la agricultura inteligente favorece una utilización más eficiente del agua, fertilizantes y productos fitosanitarios, reduciendo simultáneamente los costos operativos y el impacto ambiental derivado de la producción agrícola (Finger et al., 2019). Esta situación resulta consistente con los principios de la agricultura sostenible, donde la innovación tecnológica no solo persigue mejorar los rendimientos productivos, sino también promover una gestión responsable de los recursos naturales y disminuir la presión sobre los ecosistemas (FAO, s. f.).

Desde la perspectiva ambiental, los resultados muestran que la agricultura inteligente contribuye significativamente a la adaptación frente al cambio climático. El acceso a información meteorológica en tiempo real, modelos predictivos y sistemas automatizados de monitoreo fortalece la capacidad de los agricultores para anticipar eventos extremos y reducir las pérdidas productivas asociadas con sequías, inundaciones o variaciones de temperatura (World Economic Forum, 2022). La literatura revisada coincide en señalar que estas herramientas incrementan la resiliencia de los sistemas agrícolas y favorecen procesos de adaptación que serán cada vez más necesarios frente a los escenarios proyectados para las próximas décadas (OECD, 2020).

No obstante, la revisión evidencia que los beneficios potenciales de la agricultura inteligente continúan enfrentando importantes limitaciones para su adopción dentro de la agricultura familiar. El elevado costo inicial de determinadas tecnologías constituye una de las principales barreras identificadas por la mayoría de las investigaciones analizadas (Pierpaoli et al., 2013). Aunque el precio de sensores, drones y plataformas digitales ha disminuido progresivamente, la inversión requerida continúa representando una restricción considerable para numerosos pequeños productores, especialmente en economías en desarrollo (IFAD, 2021). Esta situación explica, en parte, la persistencia de brechas tecnológicas entre sistemas agrícolas empresariales y explotaciones familiares.

La disponibilidad de infraestructura digital representa otro de los factores determinantes identificados durante la revisión. La limitada cobertura de internet, las deficiencias en telecomunicaciones y el acceso irregular al suministro

eléctrico restringen considerablemente el funcionamiento de plataformas basadas en Internet de las Cosas y sistemas automatizados de monitoreo (OECD, 2020). En consecuencia, la transformación digital del sector agrícola depende no solamente del desarrollo tecnológico, sino también de inversiones sostenidas destinadas a fortalecer la infraestructura rural.

Otro aspecto ampliamente documentado corresponde a la necesidad de fortalecer las capacidades digitales de los productores. La literatura coincide en señalar que la adopción tecnológica aumenta cuando los agricultores reciben capacitación adecuada, comprenden el funcionamiento de las herramientas digitales y perciben beneficios concretos derivados de su utilización (University of Cambridge, 2019). Por el contrario, la escasa alfabetización digital y la limitada asistencia técnica reducen significativamente las probabilidades de incorporación sostenible de las tecnologías inteligentes dentro de los sistemas productivos (Rose et al., 2021).

La evidencia también resalta el papel estratégico que desempeñan las políticas públicas para acelerar la transformación digital de la agricultura familiar. Diversos estudios coinciden en que la disponibilidad de programas de financiamiento, incentivos para la innovación, servicios de extensión agrícola digital y alianzas entre instituciones públicas, universidades y empresas tecnológicas favorecen considerablemente la adopción de tecnologías de precisión (IFAD, 2021). Estos resultados permiten afirmar que la digitalización agrícola constituye un proceso multidimensional cuya consolidación requiere intervenciones coordinadas en los ámbitos tecnológico, económico, institucional y social.

Otro aspecto relevante identificado durante la revisión corresponde a la importancia de desarrollar soluciones tecnológicas adaptadas a las condiciones específicas de la agricultura familiar. La evidencia muestra que las tecnologías más exitosas no necesariamente corresponden a las más complejas, sino a aquellas que presentan costos accesibles, facilidad de utilización, mantenimiento sencillo y capacidad para responder a las necesidades reales de los pequeños productores (FAO, 2023). Esta situación refuerza la necesidad de promover procesos de innovación inclusiva que prioricen la accesibilidad tecnológica y reduzcan las desigualdades existentes entre diferentes tipos de productores.

La presente revisión presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas durante la interpretación de los resultados. En primer lugar, la investigación se desarrolló mediante una revisión de alcance, cuyo propósito consistió en sintetizar y mapear el conocimiento disponible sobre la agricultura inteligente aplicada a pequeños productores (Tricco et al., 2018). Además, los estudios incluidos presentan diferencias relacionadas con los contextos geográficos, los tipos de cultivos, las metodologías empleadas y los niveles de desarrollo tecnológico, situación que limita la posibilidad de establecer comparaciones directas entre todos los resultados. No obstante, la amplitud de la evidencia analizada permitió identificar tendencias consistentes acerca de las oportunidades y desafíos asociados con la agricultura inteligente, tal como señalan las revisiones de alcance propuestas por Arksey y O'Malley (2005).

Las futuras investigaciones deberían profundizar en la evaluación del impacto económico de las tecnologías digitales mediante estudios longitudinales que permitan analizar la rentabilidad de las inversiones, los tiempos de recuperación de los costos y los efectos sobre los ingresos familiares. Asimismo, resulta necesario desarrollar investigaciones orientadas a evaluar la aceptación tecnológica desde perspectivas sociales y culturales, considerando factores relacionados con el nivel educativo, la edad de los productores, el acceso a servicios de extensión y las características particulares de los territorios rurales (Jara-Rojas et al., 2021). Igualmente, sería conveniente ampliar los estudios sobre inteligencia artificial generativa, robótica agrícola y sistemas autónomos aplicados específicamente a pequeñas explotaciones, dado que estas tecnologías representan una de las principales líneas de innovación para el futuro del sector agropecuario (World Economic Forum, 2022).

En conjunto, la evidencia científica analizada confirma que la agricultura inteligente constituye una herramienta estratégica para fortalecer la productividad, sostenibilidad y resiliencia de la agricultura familiar (FAO, s. f.). Sin embargo, el aprovechamiento pleno de sus beneficios dependerá de la capacidad de los diferentes actores públicos y privados para reducir las brechas tecnológicas existentes, fortalecer la infraestructura digital, promover la capacitación de los productores y desarrollar políticas públicas inclusivas que faciliten el acceso equitativo a las tecnologías de precisión (OECD, 2020). De esta manera, la transformación digital podrá consolidarse como un instrumento efectivo

para incrementar la competitividad agrícola, contribuir al desarrollo rural sostenible y fortalecer la seguridad alimentaria, especialmente entre los pequeños productores (IFAD, 2021).

Final del formulario

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión de alcance permitió evidenciar que la agricultura inteligente constituye una estrategia fundamental para fortalecer la productividad, sostenibilidad y resiliencia de los pequeños productores agrícolas mediante la incorporación de tecnologías digitales orientadas a optimizar la toma de decisiones y el uso eficiente de los recursos disponibles. La evidencia científica analizada demuestra que herramientas como los sensores inteligentes, el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, los drones, las imágenes satelitales y los sistemas de análisis de datos contribuyen significativamente a mejorar la eficiencia de los procesos productivos, reducir los costos operativos y promover prácticas agrícolas más sostenibles (FAO, s. f.; USDA, 2023). Estos resultados confirman que la transformación digital representa uno de los pilares estratégicos para garantizar la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible del sector agropecuario en el contexto de los desafíos ambientales actuales (OECD, 2020).

La revisión también permitió identificar que la agricultura de precisión ha dejado de ser una tecnología exclusiva de explotaciones agrícolas de gran escala para convertirse progresivamente en una alternativa viable para la agricultura familiar. La disponibilidad de dispositivos de menor costo, aplicaciones móviles, plataformas digitales y soluciones tecnológicas adaptadas a las condiciones de pequeños productores ha favorecido una mayor democratización del acceso a la innovación tecnológica (FAO, 2023). No obstante, la literatura revisada indica que el nivel de adopción continúa siendo heterogéneo entre regiones y sistemas productivos, dependiendo en gran medida de las condiciones socioeconómicas, institucionales y tecnológicas existentes en cada territorio (IFAD, 2021).

Otro hallazgo relevante corresponde a los beneficios ambientales derivados de la implementación de tecnologías inteligentes. La utilización de sistemas de monitoreo en tiempo real, modelos predictivos y plataformas de análisis de información permite optimizar el uso del agua, fertilizantes y productos fitosanitarios, disminuyendo simultáneamente la presión sobre los recursos naturales y contribuyendo a la mitigación de los impactos ambientales asociados con la agricultura convencional (Finger et al., 2019). Asimismo, la posibilidad de anticipar riesgos climáticos mediante herramientas digitales fortalece la capacidad adaptativa de los pequeños productores frente a los efectos del cambio climático, incrementando la resiliencia de los sistemas agrícolas (World Economic Forum, 2022).

Sin embargo, la revisión evidenció que persisten importantes desafíos que limitan la incorporación masiva de estas tecnologías dentro de la agricultura familiar. Entre las principales barreras identificadas destacan los elevados costos iniciales de inversión, las limitaciones en infraestructura digital, la insuficiente conectividad rural, el acceso restringido a financiamiento y la escasa alfabetización digital de una parte importante de los productores agrícolas (Pierpaoli et al., 2013; OECD, 2020). A ello se suma la limitada disponibilidad de programas especializados de asistencia técnica y extensión agrícola digital, factores que continúan restringiendo el aprovechamiento pleno de las oportunidades ofrecidas por la agricultura inteligente (Rose et al., 2021).

En este contexto, la evidencia científica revisada permite concluir que el éxito de la transformación digital de la agricultura familiar dependerá de la implementación de políticas públicas integrales que promuevan el fortalecimiento de la infraestructura tecnológica rural, el acceso a mecanismos de financiamiento, la capacitación permanente de los productores y la articulación entre gobiernos, universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas y organizaciones agrícolas (IFAD, 2021). La cooperación entre estos actores constituye un elemento esencial para acelerar los procesos de innovación, reducir las brechas digitales y favorecer una adopción tecnológica sostenible que responda a las necesidades reales de los pequeños productores (FAO, s. f.).

Finalmente, esta revisión de alcance pone de manifiesto la necesidad de continuar desarrollando investigaciones orientadas a evaluar el impacto económico, social y ambiental de las tecnologías inteligentes mediante estudios empíricos realizados en diferentes contextos productivos. Asimismo, resulta pertinente profundizar en el análisis de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial generativa, la robótica agrícola, la automatización inteligente y los sistemas predictivos avanzados, considerando su potencial para transformar la agricultura familiar durante los

próximos años (World Economic Forum, 2022). En conjunto, la evidencia disponible confirma que la agricultura inteligente representa una alternativa estratégica para incrementar la competitividad del sector agropecuario, fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la seguridad alimentaria, la innovación y la producción agrícola sostenible (FAO, s. f.; OECD, 2020).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming. *Information Systems Frontiers*, 14(1), 31–48. <https://doi.org/10.1007/s10796-011-9347-7>
- Balafoutis, A. T., et al. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation. *Sustainability*, 9(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5, 359–387. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>
- Bronson, K. (2019). Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming. *NJAS*, 90-91. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100294>
- FAO. (2022). The State of Food and Agriculture 2022. <https://www.fao.org/>
- FAO. (2023). Digital Agriculture Transformation Strategy. <https://www.fao.org/>
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11, 313–335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- IFAD. (2021). Rural Development Report 2021. <https://www.ifad.org/>
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using AI. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>
- Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4). <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- OECD. (2020). Digital opportunities for better agricultural policies. <https://doi.org/10.1787/91d4f093-en>
- Pathak, H., et al. (2022). Digital technologies for sustainable agriculture. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/10.3390/su14010001>
- Peters, M. D. J., et al. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JB1 Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>
- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption. *Procedia Technology*, 8, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
- Rose, D. C., et al. (2021). The challenges of making precision agriculture work. *Nature Food*, 2, 605–606. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00369-0>

- Rotz, S., et al. (2019). The politics of digital agricultural technologies. *Canadian Journal of Development Studies*, 40(2). <https://doi.org/10.1080/02255189.2018.14956>
- Say, S. M., Keskin, M., Sehri, M., & Sekerli, Y. (2018). Adoption of precision agriculture technologies. *Precision Agriculture*, 19, 1–16.
- Shamshiri, R. R., et al. (2018). Advances in greenhouse automation. *Information Processing in Agriculture*, 5(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.05.003>
- Talaviya, T., et al. (2020). Implementation of AI in agriculture. *AI in Agriculture*, 4, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.004>
- Tricco, A. C., et al. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- United States Department of Agriculture. (2023). Precision Agriculture. <https://www.usda.gov/>
- van Etten, J., et al. (2019). Crop variety management for climate adaptation. *Nature Plants*, 5. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0376-z>
- Villa-Henriksen, A., et al. (2020). Internet of Things in agriculture. *Biosystems Engineering*, 191, 60–84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.018>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *PNAS*, 114(24), 6148–6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- 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>
- World Economic Forum. (2022). Innovation with a Purpose: The role of technology in agriculture. <https://www.weforum.org/>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

Messias António Bumba (MAB)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (MAB)

Curación de datos: (MAB)

Análisis formal: (MAB)

Adquisición de fondos: (MAB)

Investigación: (MAB)

Metodología: (MAB)

Administración del proyecto: (MAB)

Recursos: No aplica

Software: (MAB)

Supervisión: (MAB)

Validación: (MAB)

Visualización: (MAB)

Redacción – Borrador original: (MAB)

Redacción – Revisión y edición: (MAB)