

Artículo Revisión

Transformación digital de la agricultura: tendencias globales

Digital transformation of agriculture: global trends

Verónica Annabel Estrella Romero^{1*}  

¹SCIENTELIA Centro Internacional de Ciencia, Tecnología, Estudios e Investigación Avanzada, Ecuador

*Autor de correspondencia: Verónica Annabel Estrella Romero 

Recibido: 08-07-2025

Revisado: 15-07-2025

Aceptado: 22-07-2025

Publicado: 29-07-2025

Cómo citar este artículo: Estrella Romero, V. A. (2025). Transformación digital de la agricultura: tendencias globales. *Viterra*, 3(2), 1-22. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/28>

RESUMEN

La transformación digital de la agricultura constituye uno de los principales procesos de innovación tecnológica experimentados por los sistemas agroalimentarios contemporáneos. La incorporación de inteligencia artificial, Internet de las cosas, agricultura de precisión, robótica, sensores, vehículos autónomos, plataformas digitales, sistemas de información geográfica, análisis masivo de datos y tecnologías satelitales está modificando progresivamente los procesos de producción, gestión y comercialización agrícola. El objetivo de este artículo fue analizar las tendencias globales de la transformación digital de la agricultura, identificando las principales tecnologías emergentes, sus aplicaciones, beneficios, desafíos y perspectivas de desarrollo. Se realizó una revisión sistemática de literatura científica y documental mediante la consulta de publicaciones académicas, informes institucionales y documentos especializados relacionados con agricultura digital, innovación tecnológica y sostenibilidad agroalimentaria. La revisión consideró fuentes internacionales y estudios recientes orientados al análisis de los procesos de digitalización agrícola. Los resultados evidencian una expansión significativa de la inteligencia artificial, la automatización, los sistemas inteligentes de apoyo a decisiones, la agricultura basada en datos y las tecnologías de monitoreo remoto. Estas innovaciones contribuyen a optimizar el uso de recursos, incrementar la productividad, reducir costos, anticipar riesgos climáticos y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la brecha digital, los costos tecnológicos, la conectividad rural, la capacitación, la interoperabilidad, la gobernanza de datos y la ciberseguridad. Se concluye que la transformación digital representa una oportunidad estratégica para construir sistemas agrícolas más eficientes, resilientes y sostenibles, aunque su consolidación requiere políticas inclusivas, infraestructura tecnológica, investigación, innovación y fortalecimiento de las capacidades digitales de los productores.

Palabras clave: agricultura digital; agricultura inteligente; inteligencia artificial; innovación agrícola; tecnologías emergentes; transformación digital.

ABSTRACT

The digital transformation of agriculture constitutes one of the main technological innovation processes experienced by contemporary agri-food systems. The incorporation of artificial intelligence, the Internet of Things, precision agriculture, robotics, sensors, autonomous vehicles, digital platforms, geographic information systems, big data analytics, and satellite technologies is progressively modifying agricultural production, management, and marketing processes. The objective of this article was to analyse global trends in the digital transformation of agriculture, identifying the main emerging technologies, their applications, benefits, challenges, and development prospects. A systematic review of scientific and documentary literature was conducted through the consultation of academic publications, institutional reports, and specialised documents related to digital agriculture, technological innovation, and agri-food sustainability. The review considered international sources and recent studies focused on analysing agricultural digitalisation processes. The results reveal a significant expansion of artificial intelligence, automation,

intelligent decision-support systems, data-driven agriculture, and remote monitoring technologies. These innovations contribute to optimising resource use, increasing productivity, reducing costs, anticipating climate risks, and strengthening the sustainability of production systems. However, challenges persist regarding the digital divide, technological costs, rural connectivity, training, interoperability, data governance, and cybersecurity. It is concluded that digital transformation represents a strategic opportunity to build more efficient, resilient, and sustainable agricultural systems, although its consolidation requires inclusive policies, technological infrastructure, research, innovation, and the strengthening of farmers' digital capabilities.

Keywords: digital agriculture; smart farming; artificial intelligence; agricultural innovation; emerging technologies; digital transformation.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial atraviesa un proceso acelerado de transformación ante la necesidad de incrementar la productividad, garantizar la seguridad alimentaria y optimizar el aprovechamiento de los recursos naturales. A estos desafíos se suman el crecimiento demográfico, la degradación ambiental, los cambios en los patrones de consumo y la vulnerabilidad de los sistemas agroalimentarios frente al cambio climático. En respuesta, se requieren modelos productivos capaces de articular eficiencia, sostenibilidad y resiliencia. En este escenario, la transformación digital se ha convertido en uno de los principales factores de cambio de la agricultura contemporánea, debido a su capacidad para generar, procesar y utilizar información en la gestión de los procesos productivos (World Bank, 2021). La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) reconoce que este proceso puede contribuir a mejorar la toma de decisiones y fortalecer la sostenibilidad de la agricultura y las zonas rurales.

La transformación digital de la agricultura no se limita a incorporar herramientas tecnológicas en las explotaciones agrícolas. Se trata de un proceso más amplio que modifica los modelos productivos, los mecanismos de gestión, las cadenas de suministro y las relaciones entre productores, instituciones, mercados y consumidores. De acuerdo con la Trendov et al. (2019), la digitalización facilita la recopilación y el intercambio de información relacionada con los cultivos, el suelo, el clima y los recursos disponibles. Esta información permite desarrollar decisiones sustentadas en datos y aplicar modelos predictivos a diferentes etapas de la producción agrícola (World Bank, 2021).

Durante los últimos años se ha incrementado la incorporación de tecnologías como la inteligencia artificial, el Internet de las cosas, los sensores inteligentes, la robótica, los drones, los sistemas de posicionamiento global y la teledetección. Estas herramientas permiten monitorear los cultivos, identificar enfermedades, gestionar el riego y optimizar la aplicación de fertilizantes y productos fitosanitarios. Benos et al. (2021) señala que estas soluciones están ampliando las posibilidades de supervisión y control de las operaciones agrícolas. A su vez, Klerkx y Rose (2020) destaca que su integración favorece la transición desde modelos sustentados principalmente en la experiencia hacia sistemas basados en información, conectividad y análisis predictivo.

Entre las tecnologías emergentes, la inteligencia artificial presenta uno de los mayores potenciales de transformación. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar información procedente de sensores, imágenes satelitales, drones y registros históricos para reconocer patrones y generar recomendaciones. Estas aplicaciones permiten anticipar riesgos climáticos, identificar problemas fitosanitarios y optimizar la utilización de los recursos productivos. Liakos et al. (2018) identifica una expansión de los modelos predictivos y otras aplicaciones de inteligencia artificial en el sector agrícola. De manera complementaria, Javaid et al. (2022) destaca el crecimiento de estas soluciones en la planificación y gestión de las actividades productivas.

La agricultura basada en datos representa otra modificación importante en los procesos de gestión. El denominado agricultor del dato emplea información generada por sensores, maquinaria conectada y plataformas digitales para planificar sus actividades y evaluar los resultados de la producción (7). Este proceso transforma progresivamente la función tradicional del productor, quien necesita desarrollar competencias para interpretar información y utilizar herramientas digitales. La Trendov et al. (2019) señala que los sistemas de información agrícola, como AGRIS, pueden facilitar el acceso y la difusión del conocimiento necesario para impulsar la transformación digital del sector.

La mecanización inteligente y la automatización también ocupan un lugar central dentro de la transformación digital. Los vehículos autónomos, los robots agrícolas y los sistemas automatizados permiten realizar operaciones de siembra, aplicación de insumos, monitoreo y cosecha con niveles crecientes de precisión. La utilización de estas innovaciones puede reducir los costos operativos, mejorar las condiciones laborales y favorecer un aprovechamiento más eficiente de los recursos. En este sentido, la FAO (2021) reconoce el potencial de la revolución digital para transformar la mecanización agrícola y promover prácticas productivas más eficientes.

La digitalización mantiene, además, una relación directa con la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Las tecnologías de precisión permiten aplicar agua, fertilizantes y productos fitosanitarios de acuerdo con las necesidades específicas de los cultivos. Esta capacidad puede reducir los desperdicios, disminuir los impactos ambientales y mejorar el rendimiento de las explotaciones. Basso y Antle (2020) identifica una creciente integración entre innovación tecnológica y producción sostenible. Las tendencias descritas en la literatura reciente también muestran que la eficiencia en el uso de los recursos se está convirtiendo en uno de los principales objetivos de la digitalización agrícola (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

A pesar de estos beneficios, la transformación digital no se desarrolla de manera homogénea ni sus resultados se distribuyen equitativamente. La limitada conectividad rural, los elevados costos de las tecnologías, las diferencias en las competencias digitales y las dificultades para acceder a capacitación pueden profundizar las desigualdades existentes. Esta situación afecta especialmente a los pequeños productores y a las comunidades ubicadas en territorios con menor infraestructura. El World Economic Forum (2024) destaca, por ello, la necesidad de desarrollar innovaciones accesibles y adaptadas a las condiciones productivas, económicas y sociales de la agricultura familiar.

La brecha digital constituye uno de los principales obstáculos para la adopción tecnológica en la agricultura. La disponibilidad de una herramienta no garantiza que los productores puedan incorporarla de manera efectiva a sus actividades. Para ello se requieren infraestructura, conectividad, financiación, asistencia técnica y programas de formación. El World Bank (2021) advierte que estas condiciones deben integrarse en las estrategias nacionales de transformación digital. Por su parte, la Trendov et al. (2019) subraya que las soluciones digitales deben responder a las características y necesidades específicas de los distintos territorios rurales.

Otro desafío corresponde a la gobernanza de los datos agrícolas. La digitalización genera volúmenes crecientes de información sobre la producción, los recursos naturales, las condiciones ambientales y el comportamiento de los mercados. Esta situación plantea interrogantes acerca de la propiedad, privacidad, seguridad, interoperabilidad y utilización de los datos. La construcción de ecosistemas digitales confiables requiere marcos institucionales y jurídicos que protejan los derechos de los productores y, al mismo tiempo, faciliten la innovación. La FAO (2024) ha resaltado la importancia de fortalecer las regulaciones y los mecanismos de gobernanza vinculados con la agricultura digital.

Las políticas públicas desempeñan una función decisiva en estos procesos, debido a que la transformación digital demanda inversiones sostenidas en infraestructura, investigación, innovación y formación. Las estrategias impulsadas por la Trendov et al. (2019) promueven la digitalización agrícola mediante la adopción tecnológica, el intercambio de información y el desarrollo de capacidades. De forma semejante, el World Bank (2021) propone elaborar hojas de ruta que articulen las prioridades productivas con las condiciones institucionales, económicas y sociales de cada país.

Las tendencias documentadas en la literatura reciente muestran una mayor incorporación de plataformas digitales, inteligencia artificial y sistemas automatizados en los procesos productivos (11). Dhanaraju et al. (2022) destaca, además, la presentación de innovaciones agrícolas relacionadas con maquinaria inteligente y soluciones para el control de los cultivos. Klerkx y Rose (2020) identifica una creciente convergencia entre digitalización, sostenibilidad y eficiencia en la gestión agrícola.

Para los próximos años se proyecta una mayor presencia de la inteligencia artificial, la automatización, los sistemas autónomos y la agricultura predictiva. Javaid et al. (2022) señala que estas tecnologías están ampliando las posibilidades de análisis, planificación y control de la producción. Javaid et al. (2022) también identifica la automatización y la gestión inteligente de la información entre las tendencias que marcarán el desarrollo tecnológico

del sector. Paralelamente, la inversión en inteligencia artificial y digitalización continúa favoreciendo la consolidación de nuevos ecosistemas de innovación agrícola (13).

A pesar de sus beneficios, la digitalización no garantiza por sí sola una respuesta suficiente frente a los desafíos de la seguridad alimentaria. EY (2024) advierte que el aprovechamiento de las tecnologías digitales depende de su integración con estrategias económicas, productivas e institucionales más amplias. Por consiguiente, el análisis de la transformación digital debe considerar no solo la disponibilidad de tecnologías, sino también las condiciones necesarias para que estas generen resultados sostenibles y accesibles para los distintos tipos de productores.

El análisis de la transformación digital también debe superar una perspectiva exclusivamente tecnológica. La adopción de herramientas digitales modifica las competencias laborales, los modelos de negocio, las relaciones entre los diferentes actores y las estructuras productivas. Además, puede generar nuevas formas de dependencia tecnológica, concentración de la información y desigualdad entre productores. Por esta razón, las innovaciones digitales deben examinarse considerando simultáneamente sus beneficios productivos, sus implicaciones sociales y los riesgos derivados de su incorporación.

En este contexto, una revisión sistemática permite identificar, organizar y analizar la evidencia disponible sobre las tendencias internacionales de la transformación digital de la agricultura. La integración de estudios científicos y documentos institucionales facilita la comprensión de las tecnologías con mayor desarrollo, sus aplicaciones productivas, los beneficios económicos y ambientales registrados y las barreras que limitan su adopción. También permite examinar las condiciones necesarias para que la innovación tecnológica contribuya efectivamente a la sostenibilidad y la inclusión de los sistemas agroalimentarios.

Por lo expuesto, el objetivo del presente artículo es analizar las tendencias globales de la transformación digital de la agricultura mediante una revisión sistemática de la literatura. Para ello, se identifican las principales tecnologías emergentes, sus aplicaciones en los sistemas productivos, sus beneficios económicos y ambientales, los desafíos relacionados con su adopción y las perspectivas futuras para la construcción de sistemas agroalimentarios inteligentes, inclusivos, resilientes y sostenibles.

2. METODOLOGÍA

Diseño y protocolo de la revisión

El estudio se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura orientada a identificar, analizar y sintetizar la producción científica reciente relacionada con la transformación digital de la agricultura. La adopción de este diseño permitió examinar de manera estructurada las principales tendencias tecnológicas que están modificando los sistemas productivos a escala global. Snyder (14) señala que las revisiones de literatura permiten integrar conocimientos procedentes de diferentes investigaciones, reconocer tendencias y detectar vacíos dentro de un campo de estudio.

El análisis comprendió los avances relacionados con la inteligencia artificial, el Internet de las cosas, la agricultura de precisión, la robótica, la automatización, los sensores inteligentes, el análisis masivo de datos, las tecnologías satelitales, los drones y las plataformas digitales. Estas innovaciones están modificando la manera en que se recopila información, se administran los recursos y se toman decisiones en los sistemas agroalimentarios. El World Bank (2021) reconoce que la integración de tecnologías digitales puede favorecer la productividad, la eficiencia y la capacidad de respuesta de la agricultura ante los desafíos económicos y ambientales.

El proceso de revisión se organizó de acuerdo con las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020, empleada como guía para fortalecer la transparencia, trazabilidad y reproducibilidad del estudio. Su aplicación permitió estructurar las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de las publicaciones. De acuerdo con Page et al. (2021), una revisión sistemática debe presentar claramente los procedimientos utilizados para localizar, seleccionar y analizar la evidencia, de manera que las decisiones metodológicas puedan ser comprendidas y evaluadas.

La pregunta que orientó la revisión fue la siguiente: ¿Cuáles son las principales tendencias globales de la transformación digital de la agricultura y qué tecnologías, aplicaciones, beneficios, desafíos y perspectivas se identifican en la literatura científica reciente? Esta interrogante permitió delimitar el alcance temático del estudio y

establecer una relación directa entre el proceso de búsqueda, los criterios de elegibilidad, la extracción de la información y la presentación de los resultados.

A partir de la pregunta de investigación se establecieron cinco dimensiones de análisis: tecnologías digitales emergentes, aplicaciones en los sistemas productivos, beneficios económicos y ambientales, barreras para la adopción tecnológica y perspectivas futuras de la agricultura digital. La definición previa de estas dimensiones facilitó la organización de la información y la comparación de publicaciones con enfoques, metodologías y contextos geográficos diferentes. Este tipo de estructuración permite desarrollar una síntesis coherente y reconocer coincidencias, diferencias y vacíos dentro de la literatura examinada (14).

La incorporación de los beneficios económicos y ambientales respondió a la necesidad de analizar la digitalización más allá de la adopción de herramientas tecnológicas. La transformación digital también comprende cambios en la gestión de los recursos, la sostenibilidad, la conectividad y las capacidades de los productores. La FAO (2022) sostiene que las innovaciones digitales pueden contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes, resilientes e inclusivos, siempre que su implementación responda a las necesidades de las zonas rurales.

El periodo principal de análisis comprendió publicaciones difundidas entre 2018 y 2024, debido al rápido avance de las tecnologías digitales y a la necesidad de concentrar la revisión en las tendencias contemporáneas. Esta delimitación temporal permitió examinar la expansión reciente de la inteligencia artificial, la automatización, los sistemas inteligentes y las plataformas digitales aplicadas a la agricultura. No obstante, se admitieron algunos documentos institucionales anteriores a 2021 cuando su contenido resultó indispensable para comprender los antecedentes, las políticas y la evolución de la transformación digital del sector agrícola.

En conjunto, el diseño metodológico permitió desarrollar un proceso organizado para identificar las tecnologías con mayor presencia en la literatura, sus principales aplicaciones, los beneficios registrados y las barreras que condicionan su adopción. Asimismo, facilitó el análisis de las perspectivas futuras de la agricultura digital y su posible contribución a la construcción de sistemas agroalimentarios inteligentes, sostenibles, inclusivos y resilientes. La descripción transparente de estas decisiones responde a las recomendaciones de PRISMA 2020 para la presentación de revisiones sistemáticas (15).

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda de información comprendió literatura científica e institucional especializada en agricultura digital, innovación tecnológica y transformación de los sistemas agroalimentarios. Para alcanzar una cobertura amplia y multidisciplinaria del objeto de estudio, se consideraron publicaciones procedentes de las ciencias agrícolas, la ingeniería, la informática, la sostenibilidad, la economía agrícola y el estudio de las tecnologías emergentes. La literatura científica se localizó principalmente en Scopus, Web of Science y ScienceDirect, debido a la cobertura internacional y multidisciplinaria de estas fuentes. La búsqueda se complementó con Google Scholar para identificar estudios adicionales, documentos institucionales y publicaciones relevantes que no hubieran sido recuperadas en las fuentes principales.

También se incorporaron informes técnicos y documentos estratégicos publicados por la Food and Agriculture Organization of the United Nations, el World Bank, la European Commission y el World Economic Forum. La selección de estas fuentes respondió a su contribución al análisis de las políticas, estrategias y tendencias internacionales relacionadas con la digitalización agrícola. El World Bank (2021) aborda la transformación digital de los sistemas agroalimentarios desde una perspectiva que articula innovación, productividad y acceso a la información. Por su parte, la FAO (2022) examina el papel de las tecnologías digitales en la transformación de la agricultura y las zonas rurales.

Los documentos institucionales permitieron complementar los artículos científicos con información relacionada con la conectividad rural, la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la inclusión de los pequeños productores. La Trendov et al. (2019) reconoce la importancia del intercambio de datos, la infraestructura digital y el desarrollo de capacidades para modernizar el sector agrícola. De manera complementaria, el World Economic Forum (2024) destaca la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles y adaptadas a las condiciones de los pequeños agricultores.

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante descriptores en español e inglés relacionados con la transformación digital de la agricultura. En español se emplearon los términos “transformación digital de la agricultura”, “agricultura digital”, “agricultura inteligente”, “inteligencia artificial en agricultura”, “Internet de las cosas en agricultura”, “agricultura de precisión”, “robótica agrícola”, “big data agrícola” y “automatización agrícola”. En inglés se utilizaron las expresiones “digital agriculture”, “digital farming”, “smart farming”, “artificial intelligence in agriculture”, “Internet of Things in agriculture”, “precision agriculture”, “agricultural robotics” y “data-driven agriculture”. La incorporación de términos en ambos idiomas permitió ampliar la recuperación de estudios relacionados con las tecnologías que están modificando los sistemas agrícolas contemporáneos.

Los descriptores se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, con las adaptaciones requeridas por las características de cada fuente consultada. Como ecuación general de referencia se utilizó la siguiente combinación: (“digital agriculture” OR “digital farming” OR “smart farming”) AND (“artificial intelligence” OR “Internet of Things” OR “precision agriculture” OR “robotics” OR “big data”) AND (“sustainability” OR “productivity” OR “agri-food systems”). A partir de esta estructura se realizaron modificaciones en los términos y campos de búsqueda para ajustarlos a las opciones disponibles en Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar.

La búsqueda se delimitó principalmente a publicaciones difundidas entre 2018 y 2024, disponibles en español o inglés y relacionadas directamente con las tendencias tecnológicas, aplicaciones, beneficios, barreras o perspectivas de la transformación digital de la agricultura. Los resultados recuperados se examinaron de acuerdo con su correspondencia con la pregunta de investigación y las dimensiones de análisis previamente establecidas. También se consideraron algunos documentos institucionales anteriores a 2021 cuando aportaban antecedentes relevantes para comprender la evolución de las políticas y estrategias de digitalización agrícola.

Las publicaciones divulgativas y empresariales recopiladas durante la exploración inicial se utilizaron de manera complementaria para reconocer tendencias tecnológicas recientes publicadas hasta 2024. Klerkx et al. (2019) identifican el avance de la inteligencia artificial, la automatización y las plataformas de gestión dentro de la transformación digital del sector. Asimismo, Javaid et al. (2022) presentan tecnologías emergentes que están adquiriendo una presencia creciente en la agricultura mundial. Estas publicaciones se emplearon para contextualizar tendencias recientes, mientras que la fundamentación principal de los resultados se sustentó en artículos científicos e informes técnicos e institucionales especializados.

Criterios de elegibilidad

La selección de los documentos se realizó mediante criterios de inclusión y exclusión definidos antes de iniciar el proceso de cribado. Esta delimitación permitió mantener la correspondencia entre la pregunta de investigación, los objetivos planteados y la evidencia seleccionada, además de reducir la subjetividad durante la evaluación de las publicaciones. La declaración PRISMA 2020 recomienda establecer criterios explícitos que permitan justificar la inclusión o exclusión de cada registro y favorezcan la transparencia y reproducibilidad de las revisiones sistemáticas (15).

Se consideraron elegibles los artículos científicos originales, las revisiones sistemáticas y los documentos institucionales publicados principalmente entre 2018 y 2024 que abordaran directamente la transformación digital de la agricultura. Dentro de esta delimitación se incluyeron investigaciones sobre inteligencia artificial, Internet de las cosas, agricultura de precisión, sensores inteligentes, robótica, automatización, drones, teledetección, plataformas digitales, análisis masivo de datos y sistemas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones. Estas tecnologías fueron consideradas por su creciente influencia en la recopilación de información, la planificación de las actividades productivas y la modernización de los sistemas agroalimentarios (World Bank, 2021).

También se incluyeron estudios que examinaran los beneficios productivos, económicos, sociales o ambientales derivados de la utilización de tecnologías digitales. La selección comprendió publicaciones relacionadas con el incremento de la productividad, la reducción de costos, la optimización del agua y los insumos agrícolas, el monitoreo de los cultivos y el fortalecimiento de la sostenibilidad. La FAO (2022) sostiene que la transformación digital puede

contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y resilientes, siempre que las innovaciones respondan a las necesidades y condiciones de los territorios rurales.

La revisión incorporó investigaciones sobre las barreras que dificultan la adopción de tecnologías digitales, como la limitada conectividad rural, los costos de implementación, la falta de infraestructura y las diferencias en las competencias digitales de los productores. Asimismo, se consideraron los estudios que analizaran el acceso a financiación, capacitación y asistencia técnica. Estas condiciones resultan especialmente relevantes para los pequeños agricultores, quienes pueden enfrentar mayores dificultades para incorporarse a los procesos de innovación tecnológica (World Economic Forum, 2024).

Otro criterio de inclusión correspondió al análisis de la gobernanza de los datos agrícolas. En esta categoría se admitieron publicaciones relacionadas con la propiedad, privacidad, seguridad e interoperabilidad de la información generada por sensores, plataformas digitales, sistemas automatizados y maquinaria conectada. También se consideraron estudios sobre ciberseguridad y marcos regulatorios, debido a la necesidad de proteger los derechos de los productores y establecer condiciones confiables para el intercambio de información. La FAO (2024) destaca que el desarrollo de la agricultura digital debe acompañarse de disposiciones institucionales y jurídicas adaptadas a las nuevas formas de producción y gestión de datos.

Para ser incluidos, los documentos debían encontrarse disponibles en español o inglés, presentar acceso al texto completo y proporcionar información suficiente para realizar el análisis. Además, debían mantener una relación directa con el objetivo del estudio y aportar resultados sobre tecnologías, aplicaciones, beneficios, barreras o perspectivas de la transformación digital agrícola. Aunque el periodo principal comprendió los años 2018-2024, se aceptaron algunos documentos institucionales anteriores cuando aportaban antecedentes indispensables para comprender la evolución de las políticas y estrategias de digitalización del sector.

Se excluyeron los registros duplicados, las publicaciones sin relación directa con la transformación digital de la agricultura y los estudios centrados exclusivamente en tecnologías industriales sin aplicaciones agrícolas. También se descartaron los documentos que no proporcionaban información suficiente sobre las tecnologías examinadas, sus aplicaciones productivas, los beneficios identificados o los desafíos para su adopción. La aplicación de estos criterios permitió evitar la incorporación de estudios alejados de la pregunta de investigación y conservar únicamente la evidencia pertinente para la síntesis temática.

Asimismo, se excluyeron las publicaciones de opinión carentes de fundamentación científica, los documentos elaborados exclusivamente con fines comerciales o promocionales y las fuentes cuya procedencia no permitía establecer criterios mínimos de confiabilidad. Las publicaciones divulgativas y empresariales se utilizaron únicamente para contextualizar tendencias tecnológicas recientes, pero no formaron parte de la evidencia científica principal. En conjunto, estos criterios permitieron desarrollar un proceso de selección transparente, coherente y reproducible, conforme con las orientaciones metodológicas de PRISMA 2020 (15).

Proceso de selección de los estudios

El proceso de selección se desarrolló mediante las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión establecidas en la declaración PRISMA 2020. Este procedimiento permitió documentar ordenadamente los registros localizados, las publicaciones descartadas y las razones de exclusión. Según Page et al. (2021), la presentación transparente de estas etapas facilita la evaluación de la exhaustividad y reproducibilidad de una revisión sistemática.

Durante la fase de identificación se localizaron 286 registros mediante las búsquedas realizadas en las fuentes académicas y documentales seleccionadas. De este total, 214 registros procedieron de Scopus, Web of Science y ScienceDirect, mientras que 72 documentos adicionales fueron recuperados mediante Google Scholar, organismos internacionales y otras fuentes especializadas. La combinación de fuentes multidisciplinarias permitió ampliar la cobertura de la búsqueda e incorporar investigaciones científicas y documentos institucionales relacionados con la transformación digital de la agricultura.

Una vez reunidos los registros, se efectuó la depuración de los resultados para identificar publicaciones repetidas. En esta fase se eliminaron 48 registros duplicados, por lo que quedaron 238 documentos para el cribado. La eliminación de duplicados evitó que una misma publicación fuera evaluada en más de una ocasión y permitió determinar con mayor precisión la cantidad de estudios únicos recuperados.

Durante el cribado se revisaron los títulos y resúmenes de los 238 documentos identificados, de conformidad con el procedimiento recomendado para la selección inicial de estudios en una revisión sistemática (15). Esta evaluación permitió determinar la correspondencia de las publicaciones con el objetivo, la pregunta de investigación y las dimensiones de análisis. Como resultado, se excluyeron 142 documentos porque no presentaban una relación directa con la transformación digital de la agricultura, abordaban tecnologías sin aplicaciones agrícolas o no proporcionaban información relacionada con las tendencias, beneficios, barreras y perspectivas consideradas.

Después del cribado, 96 documentos fueron seleccionados para la etapa de elegibilidad, durante la cual se revisaron los textos completos. Este procedimiento permitió examinar con mayor profundidad los objetivos, métodos, resultados y conclusiones de cada publicación. La evaluación del texto completo también permitió comprobar si los documentos proporcionaban información suficiente para responder a la pregunta de investigación y si cumplían los criterios de elegibilidad previamente establecidos.

Durante la evaluación de elegibilidad se excluyeron 54 publicaciones. Las principales razones fueron la insuficiente relación con el objetivo de la revisión, la ausencia de información relevante sobre las aplicaciones o tendencias digitales, las limitaciones metodológicas y la imposibilidad de acceder al texto completo. También se descartaron documentos que reproducían resultados presentados en publicaciones ya seleccionadas, con el propósito de evitar la duplicación de la evidencia. La indicación de las razones de exclusión constituye un elemento necesario para garantizar la trazabilidad del proceso de selección (15).

Finalmente, 42 documentos cumplieron los criterios de elegibilidad y fueron incorporados a la síntesis cualitativa. Estas publicaciones proporcionaron información sobre las tecnologías digitales emergentes, sus aplicaciones en los sistemas productivos, los beneficios económicos y ambientales, las barreras para la adopción y las perspectivas futuras de la agricultura digital. La selección definitiva permitió conformar un conjunto documental coherente con el objetivo y las dimensiones establecidas en la pregunta de investigación.

En consecuencia, el proceso estuvo conformado por 286 registros identificados, 48 duplicados eliminados, 238 documentos sometidos a cribado, 96 publicaciones evaluadas mediante la lectura del texto completo y 42 estudios incluidos en la revisión. La presentación de estas cifras permite reconstruir el recorrido seguido desde la identificación inicial hasta la conformación del conjunto documental definitivo. Este procedimiento responde a las recomendaciones de PRISMA 2020 para comunicar de manera transparente las decisiones adoptadas durante la selección de los estudios (15).

Extracción, evaluación y síntesis de la información

La información de los 42 documentos incluidos se organizó mediante una matriz de extracción elaborada de acuerdo con la pregunta y los objetivos de la revisión. Este procedimiento permitió registrar de manera uniforme las características y los principales hallazgos de cada publicación, facilitando su posterior comparación. La extracción sistemática de la información contribuye a reducir inconsistencias y a mantener la trazabilidad entre los estudios seleccionados y los resultados presentados en una revisión (15).

Para cada documento se registraron el autor o la institución responsable, el año de publicación, el contexto geográfico, el diseño metodológico, la tecnología analizada y el ámbito de aplicación. La matriz también incorporó los principales resultados, los beneficios identificados, las barreras para la adopción, la contribución a la sostenibilidad y las perspectivas futuras. Esta organización permitió reconocer coincidencias y diferencias entre investigaciones realizadas en distintos sistemas productivos y contextos geográficos. Snyder (14) señala que la organización estructurada de la información constituye una etapa fundamental para integrar evidencia procedente de publicaciones con características metodológicas diversas.

Después de la extracción, los documentos se clasificaron de acuerdo con la principal tecnología o tendencia examinada. Las categorías analíticas comprendieron inteligencia artificial y aprendizaje automático, Internet de las cosas y sensores inteligentes, agricultura de precisión, análisis masivo de datos y agricultura basada en datos, drones y teledetección, robótica y automatización, plataformas y ecosistemas digitales, sistemas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones, y sostenibilidad e inclusión digital. Estas categorías facilitaron la organización de los hallazgos y permitieron analizar la transformación digital de la agricultura desde dimensiones tecnológicas, productivas, ambientales y sociales.

La evaluación de los artículos científicos consideró la claridad de sus objetivos, la pertinencia del diseño metodológico, la descripción de los procedimientos y la coherencia entre los resultados y las conclusiones. También se examinó la contribución de cada publicación a la comprensión de la transformación digital agrícola. En el caso de los documentos institucionales, se valoraron la autoridad de la organización responsable, la claridad del procedimiento empleado para producir la información y la relevancia de sus aportaciones para los objetivos de la revisión. Esta evaluación permitió reconocer las fortalezas y limitaciones de la evidencia antes de integrarla en la síntesis.

Debido a la heterogeneidad de las tecnologías, metodologías, variables, sistemas productivos y contextos geográficos examinados, no se realizó un metaanálisis estadístico. Los resultados se integraron mediante una síntesis cualitativa de carácter temático y comparativo, considerada adecuada para identificar patrones dentro de un conjunto documental diverso. El análisis temático permite organizar la información en categorías interpretativas y reconocer regularidades significativas en los datos examinados (Braun & Clarke, 2021).

En una primera etapa se identificaron los hallazgos principales de cada documento y se registraron en la matriz de extracción. Posteriormente, los resultados se agruparon de acuerdo con las categorías analíticas establecidas, lo que permitió comparar las tecnologías, aplicaciones y beneficios descritos en las publicaciones. Finalmente, se desarrolló un análisis transversal para identificar tendencias convergentes, diferencias entre estudios, tecnologías con mayor crecimiento, beneficios recurrentes, barreras para la adopción y vacíos persistentes en la literatura. La integración comparativa permitió construir una interpretación general sin perder las particularidades de los diferentes contextos analizados (14).

El procedimiento aplicado permitió examinar la transformación digital de la agricultura como un proceso sistémico y no únicamente como un conjunto aislado de innovaciones tecnológicas. Desde esta perspectiva, la agricultura digital se caracteriza por la convergencia entre datos, conectividad, automatización, inteligencia artificial y nuevas capacidades de gestión. La síntesis también permitió analizar las relaciones entre innovación, productividad, sostenibilidad e inclusión digital, manteniendo correspondencia con las dimensiones definidas en la pregunta de investigación.

En conjunto, las etapas de extracción, evaluación y síntesis proporcionaron una base analítica para examinar las principales tendencias globales de la transformación digital de la agricultura. La documentación transparente de estos procedimientos fortalece la coherencia metodológica de la revisión y permite comprender cómo se obtuvieron las interpretaciones presentadas en los resultados, en concordancia con las recomendaciones generales de PRISMA 2020 (15).

3. RESULTADOS

Panorama global de la transformación digital de la agricultura

El análisis de los 42 documentos incluidos permitió identificar una transformación progresiva de los sistemas agrícolas impulsada por la convergencia entre tecnologías digitales, conectividad, automatización y análisis de datos. La digitalización agrícola ha evolucionado desde la utilización independiente de determinadas herramientas hacia la conformación de ecosistemas capaces de integrar información procedente de sensores, satélites, drones, maquinaria y plataformas de gestión. El World Bank (2021) señala que esta integración está modificando los procesos de planificación, producción, seguimiento y comercialización dentro de los sistemas agroalimentarios. La FAO (2022)

también reconoce que la transformación digital puede generar nuevas oportunidades para mejorar la gestión de la agricultura y promover el desarrollo de las zonas rurales.

Los resultados evidenciaron que la transformación digital no presenta un desarrollo homogéneo entre regiones, sistemas productivos y tipos de productores. Las economías con mayores niveles de conectividad, infraestructura tecnológica, inversión en investigación y disponibilidad de servicios especializados presentan condiciones más favorables para incorporar herramientas digitales. En contraste, las comunidades rurales ubicadas en territorios con conectividad limitada enfrentan mayores dificultades para participar en estos procesos. La Trendov et al. (2019) reconoce que la infraestructura, el intercambio de datos y el desarrollo de capacidades son condiciones necesarias para avanzar en la digitalización del sector agrícola. Esta desigualdad resulta especialmente relevante para los pequeños productores, quienes requieren innovaciones adaptadas a sus condiciones económicas y productivas (World Economic Forum, 2024).

La literatura analizada también permitió reconocer una transición desde la agricultura de precisión hacia modelos más amplios de agricultura inteligente. La agricultura de precisión se concentra principalmente en la gestión diferenciada de los insumos y en el manejo de la variabilidad existente dentro de las explotaciones. En cambio, la agricultura inteligente incorpora tecnologías interconectadas capaces de recopilar, transmitir, procesar e interpretar información en tiempo real. Benos et al. (2021) identifica la expansión de la inteligencia artificial, los sensores y los sistemas automatizados como una de las tendencias tecnológicas más relevantes del sector. A su vez, Liakos et al. (2018) destaca el crecimiento de las aplicaciones predictivas y del análisis inteligente de datos.

Las tendencias recientes muestran una incorporación creciente de sistemas predictivos en la gestión agrícola. Las tecnologías digitales ya no se limitan a describir las condiciones existentes dentro de una explotación, sino que también permiten anticipar escenarios relacionados con el clima, la disponibilidad de agua, el comportamiento de los cultivos, la aparición de enfermedades y la evolución de los mercados. Javaid et al. (2022) identifica la agricultura predictiva entre las tecnologías con mayor capacidad para modificar la planificación productiva. Esta capacidad permite adoptar decisiones preventivas y asignar los recursos con mayor precisión antes de que se presenten pérdidas significativas.

La revisión evidenció, además, una convergencia entre transformación digital y sostenibilidad. La utilización de sensores, sistemas de riego inteligente, tecnologías satelitales y herramientas de agricultura de precisión puede reducir el consumo innecesario de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios. Basso y Antle (2020) vinculan las tendencias de innovación agrícola con una gestión más sostenible de los recursos. En las perspectivas de desarrollo examinadas hasta 2024, la eficiencia y la sostenibilidad también aparecen asociadas con la automatización y el análisis de información (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

En conjunto, los resultados muestran que la transformación digital de la agricultura avanza hacia sistemas productivos caracterizados por la generación masiva de datos, la conectividad entre dispositivos, la automatización de las operaciones, la utilización de inteligencia artificial y el desarrollo de decisiones predictivas. El World Bank (2021) señala que la integración de datos y tecnologías digitales está modificando la estructura y el funcionamiento de los sistemas agroalimentarios. Estos elementos configuran una nueva etapa de evolución tecnológica, aunque su alcance continúa condicionado por la infraestructura, la inversión y las capacidades disponibles en cada territorio.

Inteligencia artificial y aprendizaje automático en los sistemas agrícolas

La inteligencia artificial constituye una de las tendencias con mayor crecimiento dentro de la agricultura digital. Los documentos analizados muestran una expansión de las aplicaciones basadas en aprendizaje automático, aprendizaje profundo, visión computacional y modelos predictivos. Liakos et al. (2018) identifica estas herramientas entre las innovaciones con mayor potencial para transformar la agricultura, debido a su capacidad para procesar grandes cantidades de información y reconocer patrones difíciles de detectar mediante procedimientos convencionales.

Los sistemas agrícolas generan información procedente de sensores, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, drones, maquinaria y registros históricos. Los algoritmos de inteligencia artificial pueden integrar estas fuentes y transformarlas en recomendaciones para apoyar las decisiones productivas. Javaid et al. (2022) destaca que la

combinación de datos y modelos inteligentes permite mejorar la planificación, anticipar determinados riesgos y automatizar parte de las actividades desarrolladas en las explotaciones.

Entre las aplicaciones identificadas se encuentra la detección temprana de plagas y enfermedades. Los sistemas de visión computacional pueden analizar imágenes de las plantas y reconocer alteraciones asociadas con enfermedades, deficiencias nutricionales o estrés hídrico. Esta capacidad facilita la realización de intervenciones antes de que los problemas alcancen niveles capaces de ocasionar pérdidas significativas. También permite aplicar productos fitosanitarios específicamente en las áreas afectadas, lo que puede disminuir tratamientos innecesarios y reducir los impactos ambientales.

Otra aplicación relevante corresponde a la predicción del rendimiento de los cultivos. Los modelos de inteligencia artificial pueden integrar información histórica, climática, edáfica y productiva para estimar el desarrollo de la producción. Estas predicciones facilitan la planificación de la cosecha, el almacenamiento, el transporte y la comercialización. Javaid et al. (2022) señala que el análisis predictivo está adquiriendo una presencia creciente en la planificación de las actividades agrícolas y en la administración de los riesgos.

Los resultados también muestran una mayor utilización de sistemas inteligentes de recomendación. Estas herramientas pueden proporcionar información sobre las fechas de siembra, las necesidades de riego, la aplicación de fertilizantes y el manejo de enfermedades. La utilidad de sus recomendaciones depende de la calidad, actualización y representatividad de los datos empleados. Cuando la información no refleja las condiciones locales, los sistemas pueden generar resultados poco adecuados para las características particulares de una explotación.

La inteligencia artificial generativa constituye una tendencia emergente dentro de este proceso. Las aplicaciones basadas en el procesamiento del lenguaje natural pueden facilitar el acceso de los agricultores a información técnica mediante asistentes virtuales y sistemas de consulta. Javaid et al. (2022) incluye la inteligencia artificial entre las tecnologías que continuarán ampliando su presencia en el sector. Su desarrollo podría favorecer la difusión del conocimiento agrícola, especialmente cuando las herramientas utilizan un lenguaje comprensible y se adaptan a las necesidades de los productores.

No obstante, la adopción de la inteligencia artificial presenta desafíos relacionados con la disponibilidad de datos, la infraestructura tecnológica y la formación de profesionales capaces de desarrollar, implementar y mantener estos sistemas. Liakos et al. (2018) reconoce que el avance de estas aplicaciones dependerá de la capacidad del sector para integrar herramientas predictivas y sistemas de análisis inteligente. También existen riesgos derivados de recomendaciones generadas mediante información incompleta, desactualizada o poco representativa de las condiciones locales. Por esta razón, la inteligencia artificial debe utilizarse como una herramienta de apoyo que complemente el conocimiento técnico y la experiencia de los agricultores (6).

Internet de las cosas y sensores inteligentes

El Internet de las cosas representa otra tendencia fundamental de la transformación digital agrícola. Esta tecnología permite conectar dispositivos capaces de recopilar y transmitir información sobre las variables productivas de una explotación. Los sensores pueden medir la humedad del suelo, la temperatura, las condiciones climáticas, los niveles de nutrientes, el crecimiento vegetal y el comportamiento de los animales. La FAO (2022) reconoce que la conectividad y el intercambio de información son componentes importantes para el desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y adaptados a las necesidades rurales.

La información recopilada mediante los sensores puede enviarse automáticamente a plataformas digitales para su procesamiento y utilización en la toma de decisiones. Una de las principales aplicaciones corresponde al riego inteligente, en el cual los sensores de humedad permiten identificar las necesidades reales de los cultivos y activar el suministro de agua cuando las condiciones lo requieren. Este procedimiento puede incrementar la eficiencia hídrica, evitar aplicaciones innecesarias y mejorar la gestión del agua en regiones afectadas por periodos de escasez.

El Internet de las cosas también permite desarrollar sistemas de monitoreo remoto. Mediante dispositivos móviles o plataformas digitales, los productores pueden observar las condiciones de los cultivos y recibir alertas cuando se

detectan modificaciones importantes. El World Bank (2021) señala que las tecnologías digitales pueden mejorar el acceso a la información y fortalecer la capacidad de respuesta dentro de los sistemas agroalimentarios. El monitoreo remoto disminuye la necesidad de realizar inspecciones constantes y facilita la gestión de superficies agrícolas extensas o de difícil acceso.

La integración entre sensores e inteligencia artificial constituye una tendencia especialmente relevante. Mientras los dispositivos conectados recopilan información de manera continua, los algoritmos pueden analizarla, reconocer patrones y generar recomendaciones. Esta convergencia favorece el desarrollo de sistemas progresivamente automatizados, capaces de ajustar determinadas operaciones de acuerdo con las condiciones registradas. De esta manera, el Internet de las cosas funciona como una infraestructura para la agricultura basada en datos y para los sistemas inteligentes de apoyo a las decisiones.

Sin embargo, su expansión depende directamente de la disponibilidad de conectividad e infraestructura tecnológica. Numerosas zonas rurales continúan presentando limitaciones en el acceso a Internet, lo que dificulta la transmisión continua de información y el funcionamiento de los dispositivos conectados. La Trendov et al. (2019) reconoce que el desarrollo de infraestructura digital constituye una condición esencial para modernizar el sector agrícola. Estas limitaciones demuestran que la transformación digital requiere inversiones que superan la adquisición individual de sensores y equipos.

La cantidad creciente de dispositivos conectados también genera desafíos relacionados con la interoperabilidad, la privacidad y la seguridad de la información. Los sistemas desarrollados por diferentes empresas no siempre utilizan formatos compatibles ni pueden intercambiar datos entre sí, lo que dificulta la conformación de ecosistemas tecnológicos integrados. La FAO (2024) destaca la necesidad de establecer marcos regulatorios que respondan a los desafíos generados por la agricultura digital. En este contexto, el desarrollo de estándares abiertos y mecanismos de seguridad representa una prioridad para la expansión futura del Internet de las cosas en el sector agrícola.

Agricultura de precisión y optimización de recursos

La agricultura de precisión representa una de las aplicaciones más consolidadas de la transformación digital. Este enfoque utiliza información y tecnologías para gestionar la variabilidad espacial y temporal existente dentro de las explotaciones. Los sistemas de posicionamiento global, los sensores, las imágenes satelitales y la maquinaria inteligente permiten realizar intervenciones específicas según las características de cada área productiva. La FAO (2021) reconoce que las tecnologías digitales pueden transformar la mecanización agrícola y favorecer prácticas más eficientes.

La aplicación variable de fertilizantes constituye uno de los principales ejemplos de este enfoque. En lugar de distribuir cantidades uniformes sobre toda la superficie, los sistemas de precisión permiten identificar las necesidades específicas de cada zona y ajustar las dosis empleadas. Este procedimiento reduce desperdicios, disminuye los costos asociados con los insumos y puede limitar la contaminación producida por la aplicación excesiva de nutrientes.

La agricultura de precisión también puede mejorar la utilización de productos fitosanitarios. Las tecnologías de detección permiten identificar las áreas afectadas por plagas, enfermedades o malezas y desarrollar tratamientos localizados. Benos et al. (2021) identifica este tipo de soluciones entre las principales innovaciones tecnológicas incorporadas al manejo de los cultivos. Su utilización puede disminuir la cantidad de productos aplicados y reducir la exposición innecesaria de las áreas que no presentan problemas.

Otra aplicación relevante corresponde a la optimización del riego. La integración de información climática, sensores de humedad y sistemas automatizados permite ajustar la disponibilidad de agua según las necesidades de los cultivos y las condiciones del suelo. Basso y Antle (2020) destaca el uso eficiente de los recursos como una de las tendencias vinculadas con la agricultura sostenible. Los resultados revisados muestran que esta capacidad adquiere especial importancia en territorios expuestos a sequías, variabilidad climática o disponibilidad limitada de agua.

En términos generales, la agricultura de precisión contribuye simultáneamente a mejorar la eficiencia productiva y reducir determinados impactos ambientales. Su aplicación puede favorecer el aprovechamiento del agua, los

fertilizantes, los productos fitosanitarios, el combustible y el tiempo de trabajo. Por esta razón, representa uno de los principales puntos de convergencia entre digitalización y sostenibilidad dentro de los sistemas agrícolas.

A pesar de sus beneficios, la adopción de tecnologías de precisión requiere inversiones económicas, infraestructura y capacidades técnicas. Los pequeños productores pueden enfrentar mayores dificultades para adquirir maquinaria, sensores y servicios especializados. El World Economic Forum (2024) destaca la importancia de desarrollar innovaciones accesibles y adaptadas a las condiciones de la agricultura familiar. En consecuencia, la creación de servicios compartidos, cooperativas tecnológicas y plataformas de acceso colectivo puede contribuir a reducir los costos y ampliar la utilización de estas herramientas.

Agricultura basada en datos y sistemas inteligentes de apoyo a decisiones

La agricultura basada en datos representa una de las transformaciones más significativas identificadas en la revisión. La disponibilidad creciente de información permite adoptar decisiones fundamentadas en evidencias generadas directamente por los sistemas productivos. Fielke et al. (2020) utiliza el concepto de agricultor del dato para describir la evolución del productor hacia una función que combina la experiencia agrícola con la recopilación, interpretación y utilización de información digital.

Los datos pueden proceder de sensores, maquinaria conectada, satélites, registros productivos, estaciones meteorológicas y sistemas de información de mercados. La integración de estas fuentes permite obtener una visión más amplia del funcionamiento de las explotaciones y reconocer relaciones que no serían visibles mediante la observación aislada. El World Bank (2021) sostiene que el aprovechamiento de los datos puede fortalecer la planificación y mejorar la toma de decisiones dentro de los sistemas agroalimentarios.

Los sistemas inteligentes de apoyo a las decisiones procesan la información y generan recomendaciones relacionadas con diferentes actividades productivas. Estas herramientas pueden contribuir a seleccionar fechas de siembra, determinar necesidades de riego, estimar rendimientos y evaluar riesgos climáticos o fitosanitarios. La Trendov et al. (2019) destaca la importancia de los sistemas de información para facilitar el acceso al conocimiento e impulsar la transformación digital de la agricultura.

La disponibilidad de datos confiables también puede mejorar la coordinación entre productores, instituciones, investigadores y mercados. Las plataformas digitales permiten compartir información técnica, productiva y comercial, facilitando la planificación de las actividades y el acceso a nuevos servicios. Sin embargo, los resultados muestran que el aprovechamiento de estos recursos depende de la calidad de los datos, la conectividad y las capacidades de los usuarios para interpretar la información obtenida.

La expansión de la agricultura basada en datos genera interrogantes sobre la propiedad y el control de la información. Los productores generan datos mediante sus actividades, maquinaria y dispositivos, pero las plataformas utilizadas para almacenarlos o procesarlos pueden pertenecer a empresas privadas. Esta situación plantea debates relacionados con el acceso, la privacidad, la utilización comercial y los derechos de los productores. La FAO (2024) advierte sobre la necesidad de desarrollar marcos jurídicos adecuados para orientar la evolución de la agricultura digital.

La gobernanza de los datos constituye, por tanto, uno de los principales desafíos futuros. Los marcos institucionales deberán garantizar transparencia, privacidad y seguridad sin impedir la innovación tecnológica. También será necesario establecer responsabilidades claras respecto del almacenamiento, procesamiento e intercambio de la información. Estas condiciones son esenciales para generar confianza entre los usuarios y favorecer la incorporación sostenible de las plataformas digitales.

La interoperabilidad representa otro desafío importante, debido a que los datos generados por diferentes sistemas deben integrarse para producir análisis completos. La Trendov et al. (2019) reconoce el intercambio de información como uno de los componentes necesarios para avanzar en la digitalización del sector agrícola. En consecuencia, el desarrollo de estándares abiertos y formatos compatibles puede facilitar la comunicación entre sensores, maquinaria, plataformas digitales y sistemas inteligentes de apoyo a las decisiones.

En conjunto, la agricultura basada en datos representa una transformación profunda de los modelos tradicionales de gestión. Fielke et al. (2020) sostiene que el productor está evolucionando hacia una función que combina la experiencia agrícola con la interpretación y utilización de información digital. Este proceso demuestra que la transformación digital no depende exclusivamente de la disponibilidad de tecnologías, sino también de la formación de los usuarios, la conectividad y la existencia de instituciones capaces de acompañar su adopción. La FAO (2022) señala que el desarrollo de capacidades digitales resulta indispensable para que estas innovaciones contribuyan efectivamente a la transformación de la agricultura y las zonas rurales.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la revisión evidencian que la transformación digital de la agricultura constituye un proceso multidimensional que supera la incorporación aislada de tecnologías en las unidades productivas. Los hallazgos muestran una transición progresiva hacia ecosistemas agrícolas caracterizados por la convergencia entre inteligencia artificial, Internet de las cosas, agricultura de precisión, análisis de datos, robótica, automatización y plataformas digitales. El World Bank (2021) sostiene que esta integración está modificando tanto los procesos productivos como la estructura general de los sistemas agroalimentarios. Por su parte, la FAO (2022) reconoce que la digitalización también transforma la gestión agrícola, las capacidades de los productores y las estrategias institucionales vinculadas con el desarrollo rural.

Uno de los principales hallazgos corresponde al papel estratégico adquirido por los datos dentro de los sistemas agrícolas contemporáneos. La transición desde modelos productivos sustentados principalmente en la experiencia y la observación directa hacia sistemas de gestión basados en información representa una modificación significativa de los procesos de toma de decisiones. Los sensores, la maquinaria conectada, los drones y los satélites permiten obtener diagnósticos más precisos sobre las condiciones de los cultivos. Fielke et al. (2020) utiliza el concepto de agricultor del dato para describir esta transformación del productor en un usuario y gestor de información digital.

La recopilación de información, sin embargo, no garantiza por sí sola una mejora de las decisiones productivas. El valor de los datos depende de su calidad, actualización, representatividad y capacidad para integrarse con otras fuentes. La Trendov et al. (2019) destaca la importancia de los sistemas de información para facilitar el acceso al conocimiento e impulsar la transformación digital de la agricultura. En este sentido, los resultados confirman que la agricultura basada en datos funciona como un componente transversal que conecta los sensores, la inteligencia artificial, las plataformas digitales y los sistemas de apoyo a las decisiones.

Los hallazgos relacionados con la inteligencia artificial confirman su creciente importancia dentro de la digitalización agrícola. Las aplicaciones basadas en aprendizaje automático, visión computacional y modelos predictivos permiten detectar enfermedades, estimar rendimientos, optimizar recursos y anticipar riesgos productivos. Liakos et al. (2018) identifica la expansión del análisis predictivo como una de las tendencias con mayor potencial para transformar el sector. De manera complementaria, Javaid et al. (2022) señala que la inteligencia artificial continuará aumentando su presencia en la planificación y automatización de las actividades agrícolas.

La capacidad transformadora de la inteligencia artificial depende directamente de la disponibilidad de información confiable, infraestructura tecnológica y personal capacitado. Los algoritmos desarrollados mediante datos procedentes de determinados territorios pueden presentar limitaciones cuando se utilizan en contextos con características ambientales, productivas y socioeconómicas diferentes. Javaid et al. (2022) reconoce el crecimiento de las soluciones basadas en inteligencia artificial, pero su adopción requiere que las recomendaciones respondan a las condiciones reales de cada explotación. Por esta razón, los sistemas inteligentes deben someterse a procesos de adaptación y validación local antes de ser incorporados de manera generalizada.

La inteligencia artificial tampoco debe considerarse un sustituto absoluto del conocimiento de los productores. Su función principal consiste en procesar información, identificar patrones y apoyar la evaluación de diferentes alternativas. Benos et al. (2021) destaca el potencial de estas herramientas para mejorar el monitoreo y la precisión de las actividades agrícolas. Sin embargo, la decisión final debe integrar los resultados tecnológicos con la experiencia del agricultor, las condiciones del territorio y las particularidades del sistema productivo.

La integración entre inteligencia artificial e Internet de las cosas representa otra de las tendencias identificadas. Los sensores recopilan información en tiempo real, mientras los sistemas inteligentes procesan los datos y generan recomendaciones o activan determinadas operaciones. Esta convergencia permite avanzar desde el monitoreo hacia sistemas agrícolas progresivamente automatizados. El World Bank (2021) señala que la conectividad constituye una condición indispensable para aprovechar los beneficios de estos ecosistemas digitales. No obstante, su funcionamiento continúa limitado por las dificultades de acceso a Internet existentes en numerosos territorios rurales.

La conectividad no es la única condición necesaria para la expansión del Internet de las cosas. Los dispositivos deben utilizar formatos compatibles y ser capaces de intercambiar información con plataformas y sistemas desarrollados por diferentes proveedores. La Trendov et al. (2019) reconoce la importancia del intercambio de datos y de la infraestructura digital para modernizar el sector agrícola. Los resultados de la revisión muestran que la falta de interoperabilidad fragmenta la información, dificulta su análisis conjunto y puede incrementar la dependencia de los productores respecto de determinadas empresas tecnológicas.

La agricultura de precisión se presenta como uno de los principales puntos de conexión entre productividad y sostenibilidad. La aplicación diferenciada de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios permite ajustar los recursos a las necesidades específicas de cada cultivo o área productiva. Basso y Antle (2020) relaciona la innovación agrícola con una utilización más eficiente de los insumos y con la reducción de determinados impactos ambientales. Esta correspondencia confirma que las tecnologías de precisión pueden contribuir simultáneamente al rendimiento productivo y a la gestión sostenible de los recursos.

La optimización del riego adquiere especial relevancia en contextos afectados por escasez de agua y variabilidad climática. Los sensores de humedad, la información meteorológica y los sistemas automatizados permiten ajustar el suministro hídrico a las condiciones reales del suelo y de los cultivos. Saiz-Rubio y Rovira-Más (2020) identifica la eficiencia y la sostenibilidad entre las principales tendencias agroempresariales asociadas con el desarrollo tecnológico. No obstante, los beneficios dependen de la correcta instalación, mantenimiento y utilización de los sistemas.

Los hallazgos también permiten cuestionar la idea de que la digitalización produce automáticamente sistemas agrícolas sostenibles. Las tecnologías requieren dispositivos, infraestructura, energía y recursos materiales para su fabricación y funcionamiento. Además, la renovación frecuente de equipos puede incrementar la generación de residuos electrónicos. EY (2024) advierte que la digitalización no constituye por sí sola una respuesta suficiente frente a los desafíos de los sistemas alimentarios. En consecuencia, la sostenibilidad debe evaluarse considerando tanto los recursos optimizados como los impactos ambientales asociados con el ciclo de vida de las tecnologías.

La robótica y la automatización constituyen otra dimensión relevante de la transformación agrícola. Los sistemas autónomos pueden desarrollar actividades repetitivas, peligrosas o físicamente exigentes, mejorando la precisión de las operaciones. La FAO (2021) reconoce el potencial de la revolución digital para transformar la mecanización y promover prácticas agrícolas más eficientes. Las innovaciones documentadas hasta 2024 también muestran una mayor incorporación de maquinaria inteligente y soluciones automatizadas para el monitoreo, control de malezas y aplicación localizada de insumos (12).

A pesar de su potencial, los elevados costos de la robótica y la automatización continúan limitando su utilización entre los productores con menor capacidad económica. Este resultado evidencia una contradicción central de la transformación digital: algunas de las tecnologías con mayor capacidad para incrementar la eficiencia pueden encontrarse fuera del alcance de quienes enfrentan mayores limitaciones productivas. El World Economic Forum (2024) destaca la necesidad de desarrollar innovaciones adaptadas a las condiciones de los pequeños agricultores. Los servicios tecnológicos compartidos, las asociaciones de productores y los mecanismos de financiación podrían contribuir a disminuir estas barreras.

La brecha digital constituye, por tanto, uno de los principales desafíos de la agricultura contemporánea. La disponibilidad de conectividad, infraestructura, dispositivos y competencias digitales presenta importantes diferencias entre regiones y tipos de productores. El World Bank (2021) advierte que la transformación digital requiere inversiones

y estrategias capaces de evitar la ampliación de las desigualdades existentes. Sin estas condiciones, la digitalización podría beneficiar principalmente a las explotaciones que ya poseen mayores capacidades económicas y tecnológicas. La problemática de la brecha digital adquiere mayor relevancia porque numerosas innovaciones agrícolas dependen de conexiones estables y acceso permanente a servicios digitales. Los sensores, plataformas y sistemas de inteligencia artificial necesitan infraestructura para transmitir, almacenar y procesar información. La Trendov et al. (2019) incorpora la conectividad y el desarrollo de capacidades entre los componentes fundamentales de sus estrategias de digitalización agrícola. Por consiguiente, las políticas públicas deben considerar la infraestructura rural como una condición previa para ampliar la adopción tecnológica.

La capacitación representa otro componente decisivo, debido a que la transformación digital modifica las competencias necesarias para gestionar los sistemas agrícolas. Los productores requieren habilidades para utilizar dispositivos, interpretar datos y evaluar recomendaciones tecnológicas. Fielke et al. (2020) refleja esta transformación mediante el concepto de agricultor del dato, cuya función ya no se limita a ejecutar actividades productivas, sino que también comprende la gestión de información. La formación, por tanto, debe responder a las necesidades y posibilidades reales de los diferentes usuarios.

La alfabetización digital no debe orientarse exclusivamente al funcionamiento técnico de los dispositivos. Los agricultores también necesitan capacidades analíticas y críticas para evaluar la confiabilidad de los datos, identificar recomendaciones inadecuadas y tomar decisiones informadas. La FAO (2022) reconoce el desarrollo de capacidades como un componente indispensable para que la transformación digital beneficie a las zonas rurales. Este planteamiento confirma que la adopción tecnológica requiere procesos de acompañamiento y formación permanente. Otro resultado relevante corresponde a la creciente importancia de las plataformas digitales dentro de las cadenas agroalimentarias. Estas herramientas pueden conectar a los productores con mercados, instituciones financieras, proveedores y servicios técnicos, además de facilitar el acceso a información productiva y comercial. Klerkx et al. (2019) identifican las plataformas de gestión como uno de los componentes centrales de la transformación digital reciente. Su utilización puede reducir determinados costos de transacción y mejorar la coordinación entre los actores de las cadenas agrícolas.

La expansión de las plataformas también puede generar nuevas relaciones de dependencia. Las empresas responsables de administrar los sistemas digitales pueden concentrar grandes cantidades de información y adquirir una influencia creciente sobre las decisiones productivas. La FAO (2024) destaca la importancia de establecer marcos jurídicos que respondan a estas transformaciones y protejan los derechos de los actores involucrados. En consecuencia, el desarrollo de las plataformas debe acompañarse de mecanismos de transparencia, regulación y rendición de cuentas.

La gobernanza de los datos constituye uno de los principales desafíos emergentes. Los agricultores generan información mediante sus actividades, dispositivos y maquinaria, pero no siempre conocen cómo será almacenada, procesada o utilizada. La propiedad, privacidad y seguridad de los datos deben incorporarse como componentes fundamentales de las políticas agrícolas. La FAO (2024) advierte que la legislación vinculada con la agricultura digital debe adaptarse a los nuevos riesgos y relaciones generados por el intercambio de información.

La ausencia de normas claras puede reducir la confianza de los productores y limitar la adopción tecnológica. Además, la incompatibilidad entre sistemas puede obligarlos a permanecer vinculados con un solo proveedor, restringiendo su capacidad para trasladar o integrar la información. La Trendov et al. (2019) reconoce que el intercambio de datos es indispensable para desarrollar ecosistemas agrícolas digitales. En este contexto, los estándares abiertos pueden facilitar la comunicación entre dispositivos, plataformas y sistemas inteligentes.

La ciberseguridad adquiere una importancia creciente a medida que los sistemas agrícolas dependen de tecnologías conectadas. La interrupción de servicios, la manipulación de datos o el acceso no autorizado a dispositivos automatizados puede ocasionar consecuencias productivas y económicas. La FAO (2024) reconoce que la regulación de la agricultura digital debe atender los riesgos relacionados con la gestión y protección de la información. Aunque la ciberseguridad agrícola todavía presenta un desarrollo limitado dentro de la literatura revisada, es previsible que adquiera una presencia mayor con la expansión de los sistemas conectados.

La revisión también evidencia una aceleración de las tendencias tecnológicas durante los últimos años. Benos et al. (2021) identifica el crecimiento de los sensores, la inteligencia artificial y la automatización, mientras que Javaid et al. (2022) destaca la expansión de los sistemas autónomos y la gestión inteligente de la información. Estas tendencias coinciden con las proyecciones de Javaid et al. (2022), según las cuales la agricultura predictiva y las tecnologías conectadas continuarán ampliando su participación en el sector.

Sin embargo, es necesario diferenciar las tendencias tecnológicas de la evidencia científica consolidada. Algunas innovaciones reciben una considerable atención empresarial y mediática antes de que existan suficientes investigaciones independientes capaces de demostrar sus beneficios, riesgos y sostenibilidad a largo plazo. Liakos et al. (2018) y Javaid et al. (2022) ofrecen perspectivas recientes sobre la evolución tecnológica del sector, pero estas deben interpretarse como fuentes complementarias. La evaluación científica requiere estudios longitudinales y comparativos que permitan establecer resultados en diferentes contextos productivos.

La literatura institucional examinada proporciona una perspectiva relevante sobre la función de las políticas públicas. El World Bank (2021) plantea que la transformación digital requiere estrategias capaces de integrar infraestructura, innovación, capacitación y acceso a servicios. De manera complementaria, la FAO (2022) destaca la importancia de crear condiciones institucionales que permitan extender los beneficios de la digitalización hacia las zonas rurales. Estos planteamientos confirman que la adopción tecnológica no puede depender exclusivamente de las decisiones individuales de los productores.

La magnitud de las inversiones y transformaciones necesarias requiere participación gubernamental, cooperación científica y colaboración entre diferentes actores. Las políticas públicas deben promover la conectividad, la formación, la investigación y el acceso equitativo a las tecnologías. La Trendov et al. (2019) muestra que la digitalización agrícola puede abordarse mediante estrategias coordinadas de infraestructura, intercambio de datos y desarrollo de capacidades. Este enfoque resulta especialmente pertinente para evitar que las innovaciones se concentren únicamente en sistemas productivos con mayores recursos.

La inversión en investigación y desarrollo también constituye un componente fundamental. Las tecnologías deben adaptarse a diferentes cultivos, condiciones ambientales, escalas productivas y características territoriales. El World Economic Forum (2024) sostiene que las innovaciones destinadas a pequeños agricultores deben responder a sus necesidades específicas. La participación de los productores en el diseño y evaluación de las herramientas puede mejorar su utilidad, facilitar su adopción y reducir el riesgo de desarrollar soluciones alejadas de las condiciones reales. Los resultados muestran igualmente una relación creciente entre transformación digital y adaptación climática. Los sistemas de monitoreo y los modelos predictivos pueden contribuir a anticipar sequías, inundaciones y otros eventos que afectan la producción. La FAO (2022) vincula la digitalización con el fortalecimiento de la resiliencia de los territorios rurales. Sin embargo, estas tecnologías no eliminan los riesgos climáticos, sino que proporcionan información para mejorar la planificación, orientar las medidas preventivas y reducir determinadas vulnerabilidades. En conjunto, la transformación digital agrícola avanza hacia un paradigma caracterizado por la integración entre datos, conectividad, inteligencia artificial y automatización. No obstante, los resultados confirman que su éxito no depende exclusivamente del desarrollo tecnológico. El World Bank (2021) reconoce que la infraestructura, las capacidades humanas y el acceso a servicios son condiciones esenciales para aprovechar la digitalización. A estas dimensiones deben añadirse la financiación, la regulación, la gobernanza de los datos y la inclusión de los pequeños productores. Las tendencias globales muestran dos posibles trayectorias. La primera corresponde a una transformación digital concentrada en sistemas productivos con mayores capacidades económicas y tecnológicas, situación que podría ampliar las desigualdades existentes. La segunda plantea la construcción de ecosistemas digitales inclusivos, accesibles y sostenibles. El World Economic Forum (2024) respalda la necesidad de orientar la innovación hacia soluciones que respondan a las características de los pequeños productores y permitan ampliar su participación en los procesos de modernización agrícola.

La trayectoria futura dependerá de las decisiones políticas, institucionales y económicas adoptadas durante los próximos años. La transformación digital debe orientarse no solamente hacia la innovación, sino también hacia la

sostenibilidad, la equidad y la capacidad de adaptación de los sistemas agroalimentarios. La FAO (2022) reconoce que el desarrollo digital de la agricultura y las zonas rurales requiere una visión integral que articule tecnología, conocimiento y desarrollo territorial. Por tanto, el principal desafío consiste en garantizar que las innovaciones contribuyan a mejorar la productividad sin profundizar las desigualdades ni generar nuevas formas de dependencia tecnológica.

Final del formulario

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió analizar las principales tendencias globales relacionadas con la transformación digital de la agricultura, identificando las tecnologías con mayor desarrollo, sus aplicaciones en los sistemas productivos, los beneficios derivados de su implementación, las barreras que condicionan su adopción y las perspectivas que orientarán su evolución. A partir del análisis de los 42 documentos seleccionados, se determinó que el sector agrícola atraviesa una transformación estructural caracterizada por la integración progresiva de datos, conectividad, automatización, inteligencia artificial y sistemas digitales de apoyo a la toma de decisiones. Esta convergencia está modificando los procesos de producción, monitoreo, planificación y comercialización, además de generar nuevas relaciones entre productores, instituciones, proveedores tecnológicos y mercados.

La inteligencia artificial se posiciona como una de las tecnologías con mayor capacidad para transformar los sistemas agrícolas contemporáneos. Sus aplicaciones en la detección temprana de enfermedades, la predicción de rendimientos, el análisis de imágenes y la identificación de riesgos permiten desarrollar procesos productivos más precisos y preventivos. A esta evolución se suman el Internet de las cosas y los sensores inteligentes, cuya capacidad para recopilar y transmitir información en tiempo real mejora el seguimiento del suelo, el clima, la disponibilidad de agua y el estado de los cultivos. La integración entre sensores, conectividad y algoritmos inteligentes favorece el desarrollo de sistemas capaces no solo de identificar problemas, sino también de generar recomendaciones y activar determinadas operaciones de manera automatizada.

La agricultura de precisión continúa desempeñando una función estratégica dentro de este proceso. Los sistemas de posicionamiento, la aplicación variable de insumos, las imágenes satelitales, los drones y la maquinaria inteligente permiten gestionar la heterogeneidad espacial y temporal de las explotaciones. Estas herramientas pueden optimizar la utilización de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios, estableciendo una relación directa entre innovación tecnológica, eficiencia productiva y sostenibilidad ambiental. Los drones, la teledetección y las tecnologías satelitales amplían, además, las posibilidades de monitorear grandes extensiones, reconocer modificaciones en el estado de los cultivos y establecer sistemas de alerta temprana.

La agricultura basada en datos representa otro de los cambios fundamentales identificados. La integración de información procedente de sensores, maquinaria, satélites, registros productivos y mercados permite desarrollar decisiones más precisas y predictivas. Esta transformación modifica progresivamente la función tradicional del productor, quien necesita combinar sus conocimientos agrícolas con competencias para interpretar información y utilizar críticamente las herramientas digitales. En este contexto, el aprovechamiento tecnológico dependerá tanto de la disponibilidad de datos confiables como de la formación de los usuarios y de su capacidad para evaluar las recomendaciones producidas por los sistemas.

La robótica, la automatización y las plataformas digitales también presentan importantes perspectivas de crecimiento. Los vehículos autónomos y los robots especializados pueden mejorar la precisión de las operaciones, reducir la exposición de los trabajadores a actividades peligrosas y optimizar la utilización de recursos. Las plataformas, por su parte, facilitan la conexión de los agricultores con proveedores, mercados, instituciones financieras y servicios técnicos. Sin embargo, los elevados costos, la necesidad de mantenimiento especializado y la concentración de información en sistemas privados continúan representando obstáculos para una adopción amplia y equitativa.

Uno de los principales hallazgos corresponde a la persistencia de una brecha digital entre países, territorios y tipos de productores. Las limitaciones relacionadas con la conectividad rural, la infraestructura, los costos tecnológicos, la financiación y las competencias digitales pueden excluir a numerosos agricultores de los beneficios de la digitalización.

Esta situación demuestra que la transformación digital no constituye exclusivamente un desafío tecnológico, sino también económico, social e institucional. Si estas barreras no se atienden mediante políticas públicas y estrategias inclusivas, la digitalización podría profundizar las diferencias existentes entre las explotaciones con mayores recursos y los pequeños productores.

La gobernanza de los datos, la interoperabilidad y la ciberseguridad constituyen igualmente condiciones esenciales para el desarrollo de la agricultura digital. La expansión de sensores, maquinaria conectada y plataformas genera cantidades crecientes de información cuya propiedad, almacenamiento, acceso y utilización deben regularse. Al mismo tiempo, la diversidad de tecnologías y proveedores exige estándares abiertos que permitan intercambiar e integrar la información. La dependencia creciente de sistemas conectados también demanda mecanismos de protección frente a interrupciones, accesos no autorizados y manipulación de los datos.

La revisión permitió reconocer una relación estrecha entre digitalización y sostenibilidad, debido a que las tecnologías pueden mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y reducir determinados impactos ambientales. No obstante, la agricultura digital no debe considerarse automáticamente sostenible. La fabricación de dispositivos, el consumo de energía, la renovación de equipos y la generación de residuos electrónicos también deben incorporarse en las evaluaciones ambientales. En consecuencia, la sostenibilidad de estas innovaciones dependerá del equilibrio entre los beneficios productivos obtenidos y los impactos generados durante todo su ciclo de vida.

En respuesta al objetivo planteado, se concluye que la transformación digital de la agricultura constituye un proceso estratégico para la evolución de los sistemas agroalimentarios. Sus principales beneficios se relacionan con la optimización de los recursos, el incremento de la precisión productiva, la anticipación de riesgos, la mejora de las decisiones y el fortalecimiento potencial de la sostenibilidad y la resiliencia. Sin embargo, su capacidad transformadora no depende únicamente del desarrollo técnico, sino también de la existencia de infraestructura, financiación, capacitación, regulación, investigación y políticas capaces de garantizar una participación amplia de los diferentes actores.

Finalmente, el desarrollo de la agricultura digital deberá orientarse hacia un modelo que articule innovación, sostenibilidad e inclusión. El principal desafío de los próximos años no consistirá solamente en producir tecnologías más avanzadas, sino en asegurar que estas respondan a las necesidades reales de los sistemas productivos y contribuyan a reducir las desigualdades. Desde esta perspectiva, el futuro dependerá de la construcción de ecosistemas tecnológicos accesibles, interoperables, seguros y ambientalmente responsables, capaces de fortalecer la productividad, la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios globales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

World Bank. (2021). What's cooking: Digital transformation of the agrifood system.

<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35216>

Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ca4985en/ca4985en.pdf>

Benos L, Bechar A, Bochtis D. Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*. 2021;21(11):3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>.

Klerkx L, Rose D. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*. 2020;24:100347. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>.

Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018;18(8):2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>.

Javaid M, Haleem A, Khan IH, Suman R. Understanding the potential applications of artificial intelligence in agriculture sector. *Advanced Agrochem*. 2022;1(1):15-30. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001>.

- Fielke S, Taylor B, Jakku E. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review. *Agricultural Systems*. 2020;180:102763. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102763>.
- Basso B, Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*. 2020;3:254-256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>.
- Saiz-Rubio V, Rovira-Más F. From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*. 2020;10(2):207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>.
- World Economic Forum. (2024, septiembre 9). Así es como la innovación tecnológica ayuda a los pequeños agricultores. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/innovation-technology-smallholder-farmers/>
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Dhanaraju M, Chenniappan P, Ramalingam K, Pazhanivelan S, Kaliaperumal R. Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. *Agriculture*. 2022;12(10):1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>.
- Birner R, Daum T, Pray C. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*. 2021;43(4):1260-1285. <https://doi.org/10.1002/aepp.13145>.
- Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. 2019;104:333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>.
- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, Moher D. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). One size fits all? What counts as quality practice in (reflexive) thematic analysis? *Qualitative Research in Psychology*, 18(3), 328–352. <https://doi.org/10.1080/14780887.2020.1769238>
- Ayaz M, Ammad-Uddin M, Sharif Z, Mansour A, Aggoune EHM. Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*. 2019;7:129551-129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). La revolución digital y su potencial para transformar el uso de la mecanización motorizada y las prácticas agrícolas. <https://www.fao.org/3/cb2186es/cb2186es.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024, enero 25). Legislar la e-agricultura: ¿Por qué es importante? <https://www.fao.org/legal-services/news/detail/es/c/1677616/>
- Ingram, J., & Maye, D. (2020). What are the implications of digitalisation for agricultural knowledge? *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 66. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00066>
- Jung J, Maeda M, Chang A, Bhandari M, Ashapure A, Landivar-Bowles J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. *Current Opinion in Biotechnology*. 2021;70:15-22. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>.

Lowenberg-DeBoer J, Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*. 2019;111(4):1552-1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>.

Zhai Z, Martínez JF, Beltran V, Martínez NL. Decision support systems for agriculture 4. 0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;170:105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.

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:

Verónica Annabel Estrella Romero (VAER)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (VAER)

Curación de datos: (VAER)

Análisis formal: (VAER)

Adquisición de fondos: (VAER)

Investigación: (VAER)

Metodología: (VAER)

Administración del proyecto: (VAER)

Recursos: No aplica

Software: (VAER)

Supervisión: (VAER)

Validación: (VAER)

Visualización: (VAER)

Redacción – Borrador original: (VAER)

Redacción – Revisión y edición: (VAER)