

Artículo Revisión

Convergencia entre la industria 4.0 y la agricultura inteligente: oportunidades y desafíos para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias

Convergence between industry 4.0 and smart agriculture: opportunities and challenges for small and medium-sized agri-food enterprises

Nadia Elizabeth Rodríguez Castillo^{1*}  

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

*Autor de correspondencia: Nadia Elizabeth Rodríguez Castillo 

Recibido: 08-05-2025

Revisado: 15-05-2025

Aceptado: 22-05-2025

Publicado: 29-05-2025

Cómo citar este artículo: Rodríguez Castillo, N. E. (2025). Convergencia entre la industria 4.0 y la agricultura inteligente: oportunidades y desafíos para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias. *Viterra*, 3(1), 1-30. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/18>

RESUMEN

La convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente ha transformado los sistemas agroalimentarios mediante la incorporación de tecnologías digitales que favorecen una producción más eficiente, sostenible y basada en datos. Herramientas como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT), el aprendizaje automático, el Big Data, la computación en la nube, los sensores inteligentes y la robótica están modificando la manera en que las pequeñas y medianas empresas (PYMES) agroalimentarias gestionan sus procesos productivos, optimizan recursos y fortalecen su competitividad. El objetivo de esta revisión narrativa fue analizar la literatura científica sobre la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente, identificando las principales tecnologías involucradas, las oportunidades que ofrecen para las PYMES agroalimentarias y los desafíos que condicionan su adopción. Para ello, se realizó una revisión de publicaciones científicas, informes técnicos y documentos institucionales publicados entre 2018 y 2024, procedentes de bases de datos especializadas y organismos internacionales. La evidencia revisada muestra que la integración de tecnologías digitales mejora la productividad, facilita la toma de decisiones basada en datos, incrementa la eficiencia en el uso del agua, la energía y otros insumos, fortalece la trazabilidad de la cadena agroalimentaria y favorece modelos de producción más sostenibles. Sin embargo, también se identifican limitaciones relacionadas con los elevados costos de implementación, la insuficiente infraestructura tecnológica, la conectividad en zonas rurales, la escasez de competencias digitales, la interoperabilidad entre plataformas y la gobernanza de los datos. Se concluye que la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente representa una oportunidad estratégica para modernizar las PYMES agroalimentarias; no obstante, su consolidación requiere políticas públicas, inversión tecnológica, fortalecimiento de capacidades y cooperación entre los sectores académico, productivo y gubernamental para impulsar una transformación digital inclusiva y sostenible.

Palabras clave: Industria 4.0; Agricultura Inteligente; transformación digital; inteligencia artificial; pequeñas y medianas empresas agroalimentarias.

ABSTRACT

The convergence of Industry 4.0 and Smart Agriculture has transformed agri-food systems through the incorporation of digital technologies that promote more efficient, sustainable, and data-driven production. Technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), machine learning, Big Data, cloud computing, smart sensors, and robotics are changing the way small and medium-sized agri-food enterprises (SMEs) manage their production processes, optimise resources, and strengthen their competitiveness. The objective of this narrative review was to analyse the scientific literature on the convergence between Industry 4.0 and Smart Agriculture, identifying the main

technologies involved, the opportunities they offer for agri-food SMEs, and the challenges that influence their adoption. To this end, a review of scientific publications, technical reports, and institutional documents published between 2015 and 2024 was conducted using evidence retrieved from specialised databases and international organisations. The reviewed evidence shows that the integration of digital technologies improves productivity, facilitates data-driven decision-making, increases the efficiency of water, energy, and other input use, strengthens traceability across the agri-food supply chain, and promotes more sustainable production models. However, the literature also identifies limitations related to high implementation costs, insufficient technological infrastructure, poor connectivity in rural areas, limited digital skills, interoperability among digital platforms, and data governance. It is concluded that the convergence between Industry 4.0 and Smart Agriculture represents a strategic opportunity to modernise agri-food SMEs; nevertheless, its consolidation requires public policies, technological investment, capacity building, and cooperation among academia, industry, and government to foster an inclusive and sustainable digital transformation.

Keywords: Industry 4.0; Smart Agriculture; digital transformation; artificial intelligence; agri-food small and medium-sized enterprises.

1. INTRODUCCIÓN

La transformación digital constituye uno de los procesos más significativos que han experimentado los sectores productivos durante la última década. El desarrollo acelerado de tecnologías digitales avanzadas ha dado origen al paradigma de la Industria 4.0, considerado la cuarta revolución industrial, el cual se caracteriza por la integración de sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT), Big Data, computación en la nube, robótica y automatización inteligente para incrementar la eficiencia, la productividad y la competitividad de las organizaciones. Como señalan Frank et al. (2019), este modelo ha impulsado profundas transformaciones en diversos sectores estratégicos, entre ellos la manufactura, la logística, la salud y, más recientemente, la producción agroalimentaria, favoreciendo nuevas formas de gestión basadas en la conectividad, la automatización y el análisis inteligente de datos. La incorporación de los principios de la Industria 4.0 al sector agrícola ha propiciado el desarrollo de la denominada Agricultura Inteligente (Smart Agriculture) o Agricultura 4.0, entendida como un modelo productivo que integra tecnologías digitales para optimizar la gestión de los cultivos, mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios. En este contexto, Klerkx et al. (2019) destacan que la combinación de Big Data, plataformas digitales y sistemas inteligentes permite transformar la toma de decisiones agrícolas mediante el procesamiento continuo de grandes volúmenes de información. De forma complementaria, Liakos et al. (2018) señalan que la incorporación de inteligencia artificial, aprendizaje automático, sensores inteligentes, drones e imágenes satelitales facilita el monitoreo permanente de las condiciones de producción y favorece una agricultura más precisa, eficiente y sostenible.

La evolución hacia la Agricultura Inteligente responde a desafíos globales asociados con el crecimiento demográfico, la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria y los efectos del cambio climático sobre los sistemas de producción agrícola. Frente a este escenario, la digitalización permite desarrollar modelos productivos capaces de optimizar el uso de agua, fertilizantes, energía y otros insumos mediante el monitoreo continuo de variables agronómicas, la automatización de procesos y el análisis predictivo de datos. Saiz-Rubio y Rovira-Más (2020) sostienen que el análisis de grandes volúmenes de información constituye uno de los principales pilares de la agricultura digital, mientras que Ayaz et al. (2019) destacan que el Internet de las Cosas facilita la recopilación de información en tiempo real para mejorar la eficiencia operativa y apoyar decisiones basadas en evidencia. Como consecuencia, la agricultura evoluciona desde modelos fundamentados principalmente en la experiencia empírica hacia sistemas de gestión sustentados en información precisa y herramientas inteligentes.

La literatura científica coincide en señalar que la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente está modificando profundamente la organización de las cadenas agroalimentarias. La integración del Internet de las Cosas, el Big Data y la inteligencia artificial favorece la trazabilidad de los productos, optimiza los procesos logísticos, fortalece el control de calidad y mejora la gestión integral de las explotaciones agrícolas mediante plataformas digitales

interconectadas. Fountas et al. (2020) destacan que los sistemas de gestión de la información agrícola permiten una administración más eficiente de las explotaciones, mientras que Verdouw et al. (2021) evidencian que la virtualización de las cadenas agroalimentarias mejora la coordinación entre los diferentes actores del sistema productivo. Asimismo, Benos et al. (2021) señalan que la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial favorece la detección temprana de enfermedades, la predicción del rendimiento de los cultivos y la optimización del uso de recursos productivos.

Dentro de este escenario, las pequeñas y medianas empresas (PYMES) agroalimentarias desempeñan un papel esencial en la generación de empleo, el desarrollo económico y el abastecimiento alimentario de numerosos países. No obstante, estas organizaciones enfrentan mayores dificultades para incorporar tecnologías digitales debido a limitaciones financieras, insuficiente infraestructura tecnológica, escasa capacitación del talento humano y problemas de conectividad, particularmente en las zonas rurales. De acuerdo con la Klerkx et al. (2019), estas condiciones generan importantes brechas en la velocidad de adopción de tecnologías digitales entre las grandes empresas y las PYMES, limitando su capacidad para competir en mercados caracterizados por una creciente digitalización.

A pesar de estas limitaciones, la evidencia científica demuestra que la transformación digital representa una oportunidad estratégica para fortalecer la competitividad de las PYMES agroalimentarias. Jha et al. (2019) indican que la incorporación de inteligencia artificial y sistemas automatizados contribuye a mejorar la eficiencia de los procesos agrícolas, reducir costos operativos y optimizar el uso de los recursos disponibles. De manera complementaria, el IFPRI (2023) resalta que la innovación, la información oportuna y las capacidades institucionales fortalecen la respuesta de los sistemas agroalimentarios ante crisis y presiones productivas; en este marco, la inteligencia artificial puede integrarse con otras tecnologías digitales para apoyar decisiones más eficientes. Asimismo, tanto la European Commission (2020) como FAO (2022) coinciden en que la transformación digital constituye un elemento estratégico para construir sistemas agroalimentarios más resilientes, sostenibles y competitivos frente a los desafíos económicos, ambientales y sociales actuales.

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías continúa enfrentando desafíos importantes relacionados con la interoperabilidad entre plataformas digitales, la calidad y gobernanza de los datos, la ciberseguridad, la resistencia al cambio organizacional y la necesidad de fortalecer las competencias digitales de productores y empresas. Klerkx et al. (2019) señalan que la confianza en el manejo de los datos y la facilidad de uso de las tecnologías representan factores determinantes para su adopción, mientras que Bacco et al. (2019) destacan que las limitaciones de infraestructura tecnológica y conectividad continúan restringiendo la consolidación de ecosistemas agrícolas verdaderamente inteligentes. En consecuencia, la transformación digital no depende exclusivamente del desarrollo tecnológico, sino también de factores económicos, sociales, institucionales y regulatorios que condicionan la incorporación efectiva de las innovaciones.

Desde la perspectiva científica, el creciente número de investigaciones sobre Industria 4.0 y Agricultura Inteligente evidencia el interés por comprender las implicaciones de la digitalización en los sistemas agroalimentarios. No obstante, una parte importante de la literatura aborda ambos temas de manera independiente, existiendo un número limitado de revisiones que analicen de forma integrada la convergencia entre estos dos paradigmas y, particularmente, sus implicaciones para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de sintetizar el conocimiento disponible, identificar las principales tendencias tecnológicas y reconocer las oportunidades y desafíos que condicionan la transformación digital del sector. En este contexto, el presente estudio adquiere relevancia al proporcionar una visión integradora sobre las tecnologías que articulan la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente, así como sobre las oportunidades y limitaciones que enfrentan las PYMES agroalimentarias durante su proceso de digitalización. La revisión busca aportar evidencia que contribuya al diseño de estrategias orientadas a fortalecer la innovación tecnológica, mejorar la competitividad empresarial y promover modelos de producción sostenibles sustentados en el uso inteligente de la información y las tecnologías digitales.

En consecuencia, el objetivo de esta revisión narrativa es analizar la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente, identificando las principales tecnologías digitales involucradas, las oportunidades que ofrecen para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias y los desafíos

que condicionan su adopción, con el propósito de proporcionar una visión integral que contribuya al fortalecimiento de la transformación digital, la innovación y la sostenibilidad del sector agroalimentario.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló mediante una revisión narrativa de la literatura, metodología que permite sintetizar, analizar e interpretar de manera crítica el conocimiento científico disponible sobre una temática específica, integrando evidencia procedente de investigaciones con diferentes enfoques metodológicos. Este tipo de revisión resulta particularmente adecuado para examinar campos de conocimiento en constante evolución, como la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente, ya que facilita la identificación de avances tecnológicos, tendencias emergentes, oportunidades y desafíos asociados con la transformación digital del sector agroalimentario, especialmente en el contexto de las pequeñas y medianas empresas (PYMES).

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo entre enero y marzo de 2025 mediante la consulta de bases de datos científicas de amplio reconocimiento internacional, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore y Google Scholar. De forma complementaria, se revisaron informes técnicos y documentos institucionales elaborados por organismos internacionales especializados en innovación tecnológica, transformación digital y desarrollo agrícola, entre los que destacan la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), la European Commission, el International Food Policy Research Institute (IFPRI) y la Committee for European Agricultural Machinery (CEMA). La incorporación de estas fuentes permitió complementar la evidencia científica con información técnica y documentos de referencia ampliamente utilizados en el ámbito de las políticas de innovación y agricultura digital.

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante la combinación de palabras clave en español e inglés relacionadas con el objeto de estudio. Entre los términos empleados se incluyeron Industry 4.0, Smart Agriculture, Agriculture 4.0, Digital Agriculture, Artificial Intelligence, Internet of Things, Machine Learning, Big Data, Precision Agriculture, Agri-food SMEs, Small and Medium-sized Enterprises, Digital Transformation y Farm Management Information Systems. Estos descriptores fueron combinados mediante operadores booleanos (AND y OR) con el propósito de ampliar la cobertura de la búsqueda y recuperar publicaciones relacionadas con la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente, así como con la adopción de tecnologías digitales en las PYMES agroalimentarias.

Con el fin de garantizar la actualidad, pertinencia y calidad de la evidencia analizada, se establecieron criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Se consideraron artículos científicos originales, artículos de revisión, informes técnicos y documentos institucionales publicados entre 2018 y 2024, disponibles en idioma español o inglés y relacionados con la aplicación de tecnologías digitales al sector agroalimentario. Asimismo, se incluyeron investigaciones centradas en inteligencia artificial, Internet de las Cosas, Big Data, aprendizaje automático, agricultura inteligente, agricultura de precisión, Industria 4.0, sistemas de gestión agrícola y transformación digital en pequeñas y medianas empresas agroalimentarias.

Se excluyeron publicaciones duplicadas, documentos de opinión, literatura sin respaldo científico, trabajos cuyo contenido no guardara relación directa con los objetivos de la investigación y publicaciones que no aportaran información suficiente para sustentar el análisis temático desarrollado. Este proceso permitió seleccionar la evidencia más relevante y consistente con el propósito de la revisión.

Las publicaciones seleccionadas fueron organizadas mediante una matriz documental diseñada para sistematizar la información más relevante de cada estudio. En dicha matriz se registraron variables como autores, año de publicación, tipo de documento, tecnologías analizadas, contexto de aplicación y principales aportes científicos. Posteriormente, la información fue examinada mediante un proceso de análisis temático que permitió agrupar la evidencia en seis ejes principales: (i) fundamentos y evolución de la Industria 4.0; (ii) Agricultura Inteligente como evolución de la Agricultura 4.0; (iii) convergencia tecnológica entre ambos paradigmas; (iv) oportunidades para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias; (v) desafíos asociados con la adopción de tecnologías digitales; y (vi) tendencias y perspectivas futuras.

Finalmente, el análisis de la información se desarrolló mediante una síntesis narrativa orientada a comparar los principales hallazgos reportados por la literatura, identificar coincidencias y diferencias entre las investigaciones,

reconocer tendencias emergentes y analizar las implicaciones de la transformación digital para las PYMES agroalimentarias. La organización temática de la evidencia permitió construir una visión integradora del estado actual del conocimiento, destacando tanto las oportunidades que ofrecen las tecnologías digitales para fortalecer la productividad, la sostenibilidad y la competitividad del sector agroalimentario como los desafíos tecnológicos, económicos, organizacionales e institucionales que aún limitan su adopción y consolidación.

3. DESARROLLO

La transformación digital ha generado una profunda reconfiguración de los sistemas productivos en prácticamente todos los sectores económicos. En este contexto, la Industria 4.0 ha impulsado un nuevo paradigma basado en la digitalización, la conectividad, la automatización inteligente y el análisis masivo de datos, modificando la manera en que las organizaciones diseñan, gestionan y optimizan sus procesos. Paralelamente, el sector agroalimentario ha comenzado a incorporar estos principios tecnológicos mediante el desarrollo de la Agricultura Inteligente (Smart Agriculture), modelo que integra tecnologías digitales avanzadas para incrementar la eficiencia productiva, fortalecer la sostenibilidad ambiental y mejorar la capacidad de respuesta frente a los desafíos asociados con la seguridad alimentaria y el cambio climático (Frank et al., 2019; Klerkx et al., 2019).

La convergencia entre ambos paradigmas representa uno de los procesos de innovación más importantes para el futuro del sector agroalimentario. Más que la simple incorporación de herramientas tecnológicas, esta convergencia implica una transformación estructural de los modelos de producción, caracterizada por la integración de información proveniente de múltiples fuentes, la automatización de procesos, el análisis predictivo y la toma de decisiones basada en datos. En consecuencia, las tecnologías digitales dejan de funcionar como soluciones independientes para convertirse en componentes de un ecosistema inteligente donde personas, maquinaria, plataformas digitales y sistemas de información interactúan de manera permanente.

Desde esta perspectiva, las pequeñas y medianas empresas (PYMES) agroalimentarias enfrentan un escenario particularmente desafiante. Por una parte, la digitalización ofrece oportunidades para incrementar la productividad, optimizar el uso de recursos, mejorar la calidad de los productos y fortalecer la competitividad en mercados globalizados. Por otra, la incorporación de estas tecnologías exige inversiones, infraestructura, capacitación y procesos de adaptación organizacional que no siempre se encuentran al alcance de este tipo de empresas. En consecuencia, comprender la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente resulta indispensable para identificar estrategias que favorezcan una transformación digital sostenible e inclusiva.

Con base en estos planteamientos, el presente desarrollo analiza la evolución conceptual de ambos paradigmas, la integración tecnológica que los articula, las transformaciones que generan en las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, las oportunidades derivadas de su implementación, los principales desafíos asociados con la adopción tecnológica y las tendencias que orientarán el futuro de los sistemas agroalimentarios inteligentes.

3.1 De la Industria 4.0 a la Agricultura Inteligente: una transformación del paradigma productivo

La evolución de los sistemas productivos ha estado estrechamente vinculada al desarrollo tecnológico característico de cada una de las revoluciones industriales. Mientras que la primera revolución industrial introdujo la mecanización mediante la máquina de vapor, la segunda impulsó la producción en serie gracias al aprovechamiento de la energía eléctrica y la tercera consolidó la automatización mediante la informática y la electrónica. En este proceso evolutivo, la Industria 4.0 representa un cambio de paradigma al integrar tecnologías digitales avanzadas, sistemas ciberfísicos y procesos inteligentes capaces de conectar el mundo físico con el digital mediante el intercambio continuo de información. Como señalan Frank et al. (2019), esta revolución no solo incorpora nuevas tecnologías, sino que redefine la manera en que las organizaciones producen, gestionan recursos y generan valor a partir de la información.

A diferencia de los modelos tradicionales, donde los procesos productivos operaban de manera secuencial y con escasa capacidad de adaptación, la Industria 4.0 se sustenta en ecosistemas digitales altamente interconectados, en los cuales sensores, plataformas inteligentes, sistemas automatizados y operadores humanos intercambian información en tiempo real. Este enfoque permite optimizar la planificación, reducir tiempos de respuesta y anticipar problemas mediante el análisis predictivo de datos. En este contexto, la información deja de ser únicamente un recurso de apoyo

para convertirse en el principal activo estratégico de las organizaciones, favoreciendo procesos productivos más flexibles, eficientes y adaptativos (Frank et al., 2019).

La consolidación de este paradigma trascendió rápidamente el ámbito manufacturero y comenzó a extenderse hacia otros sectores estratégicos, particularmente el agroalimentario, donde la necesidad de incrementar la productividad sin comprometer la sostenibilidad ambiental impulsó la incorporación de tecnologías digitales avanzadas. Factores como el crecimiento demográfico, la variabilidad climática, la presión sobre los recursos naturales y la creciente demanda mundial de alimentos aceleraron la búsqueda de modelos productivos capaces de integrar innovación tecnológica con eficiencia y sostenibilidad. En este sentido, Klerkx et al. (2019) destacan que la digitalización constituye uno de los principales mecanismos para transformar los sistemas agroalimentarios mediante el uso estratégico de la información y la conectividad.

Como resultado de esta evolución surgió el concepto de Agricultura Inteligente (Smart Agriculture), entendido como la aplicación de los principios de la Industria 4.0 al sector agrícola mediante la integración de inteligencia artificial, Internet de las Cosas, sensores inteligentes, plataformas digitales, imágenes satelitales y sistemas de análisis de datos que permiten optimizar la producción agrícola. Liakos et al. (2018) sostienen que este paradigma supera los enfoques tradicionales de mecanización y agricultura de precisión al incorporar herramientas capaces de procesar grandes volúmenes de información y generar recomendaciones específicas para apoyar la toma de decisiones. En la misma línea, Jha et al. (2019) destacan que la incorporación de tecnologías inteligentes favorece una agricultura más eficiente, resiliente y sostenible, al facilitar el monitoreo permanente de los cultivos y optimizar el uso de recursos productivos. Más allá de la incorporación de nuevas herramientas tecnológicas, la Agricultura Inteligente representa un cambio profundo en la forma de comprender la gestión agroalimentaria. Tradicionalmente, las decisiones relacionadas con el manejo de cultivos dependían en gran medida de la experiencia acumulada por los productores y de observaciones directas realizadas en el campo. Actualmente, estas decisiones pueden complementarse con información obtenida en tiempo real mediante sensores, estaciones meteorológicas, drones, imágenes satelitales y plataformas analíticas capaces de interpretar múltiples variables simultáneamente. Como señalan Saiz-Rubio y Rovira-Más (2020), la combinación entre conocimiento agronómico y análisis inteligente de datos permite desarrollar sistemas productivos más precisos, adaptativos y orientados hacia la anticipación de riesgos.

En este contexto, el valor estratégico de la digitalización no radica únicamente en la disponibilidad de tecnologías, sino en la capacidad para transformar grandes volúmenes de datos en conocimiento útil para la gestión agrícola. Klerkx et al. (2019) destacan que la verdadera innovación consiste en integrar información procedente de diversas fuentes para generar recomendaciones que optimicen la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. De manera complementaria, Klerkx et al. (2019) señalan que el desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión constituye uno de los avances más relevantes de la agricultura digital, ya que facilita la planificación y el manejo de los cultivos mediante información objetiva, actualizada y contextualizada.

La transformación digital también ha redefinido la organización de las cadenas agroalimentarias. La incorporación de plataformas digitales favorece una interacción más estrecha entre productores, distribuidores, industrias procesadoras, organismos de control y consumidores, fortaleciendo la trazabilidad, la coordinación logística y el intercambio permanente de información. En consecuencia, la Agricultura Inteligente trasciende el ámbito de la producción primaria para consolidarse como un modelo integral de gestión que articula todos los eslabones de la cadena de valor agroalimentaria, favoreciendo procesos más eficientes, transparentes y sostenibles.

Desde la perspectiva empresarial, esta evolución adquiere especial relevancia para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, responsables de una parte significativa de la producción y comercialización de alimentos en numerosos países. No obstante, estas organizaciones enfrentan mayores dificultades para incorporarse a la transformación digital debido a limitaciones relacionadas con la disponibilidad de recursos financieros, infraestructura tecnológica, conectividad y formación especializada del talento humano. La Klerkx et al. (2019) evidencia que estas barreras continúan condicionando la velocidad de adopción de tecnologías propias de la Industria 4.0, generando diferencias importantes en competitividad e innovación entre empresas de distinto tamaño.

A pesar de estas limitaciones, la creciente disponibilidad de soluciones basadas en computación en la nube, aplicaciones móviles, sensores inteligentes y servicios digitales está reduciendo progresivamente las barreras de acceso a la innovación tecnológica. Esta democratización de las tecnologías digitales permite que un número cada vez mayor de pequeñas empresas incorpore herramientas anteriormente reservadas para grandes organizaciones, fortaleciendo su capacidad para optimizar procesos, mejorar la eficiencia productiva y responder con mayor rapidez a las exigencias del mercado. Como consecuencia, la digitalización se consolida como un mecanismo para impulsar sistemas agroalimentarios más competitivos, resilientes y sostenibles.

En síntesis, la transición desde la Industria 4.0 hacia la Agricultura Inteligente representa una evolución natural de los sistemas productivos en la era digital. Ambos paradigmas comparten principios relacionados con la conectividad, la automatización y el aprovechamiento estratégico de la información; sin embargo, su verdadero potencial emerge de la convergencia entre múltiples tecnologías que funcionan de manera integrada dentro de un mismo ecosistema digital. Comprender esta articulación tecnológica resulta fundamental para analizar las oportunidades y desafíos que enfrentan las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias en su proceso de transformación digital y constituye el punto de partida para examinar, en el siguiente apartado, los mecanismos mediante los cuales esta convergencia redefine la producción agroalimentaria contemporánea.

3.2. La convergencia tecnológica entre la manufactura inteligente y la producción agroalimentaria

La convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente constituye uno de los procesos de transformación más significativos que experimenta actualmente el sector agroalimentario. Este fenómeno trasciende la simple incorporación de tecnologías digitales al ámbito agrícola y representa un cambio estructural en la manera en que se organizan, gestionan y optimizan los sistemas de producción. La integración de sensores inteligentes, plataformas digitales, sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial y herramientas avanzadas de análisis de datos ha favorecido la construcción de ecosistemas interconectados donde la información circula continuamente entre personas, maquinaria, procesos y plataformas tecnológicas. Como señalan Frank et al. (2019), la esencia de la Industria 4.0 radica precisamente en la capacidad de integrar componentes físicos y digitales dentro de sistemas inteligentes capaces de responder dinámicamente a las condiciones del entorno. Esta visión ha sido progresivamente adaptada al sector agroalimentario, impulsando una transformación profunda de los procesos productivos mediante el uso estratégico de la información.

No obstante, la transferencia de los principios de la Industria 4.0 hacia la agricultura no constituye una simple reproducción de modelos desarrollados para la manufactura. Las actividades agroalimentarias presentan características particulares asociadas a la variabilidad climática, los ciclos biológicos, la heterogeneidad de los suelos y la influencia permanente de factores ambientales que dificultan la estandarización de los procesos productivos. En consecuencia, las tecnologías digitales han debido adaptarse a estas condiciones mediante el desarrollo de soluciones capaces de interpretar información dinámica y generar respuestas específicas para cada contexto agrícola. Saiz-Rubio y Rovira-Más (2020) destacan que esta capacidad de adaptación constituye uno de los principales elementos diferenciadores de la Agricultura Inteligente, al combinar el potencial de las tecnologías digitales con el conocimiento agronómico para optimizar la toma de decisiones en escenarios altamente variables.

Uno de los cambios más relevantes derivados de esta convergencia corresponde a la evolución desde modelos de producción fundamentados en registros históricos hacia sistemas de gestión orientados por el análisis continuo de datos. La incorporación de sensores ambientales, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, drones, maquinaria conectada y dispositivos móviles ha multiplicado la capacidad para recopilar información sobre el estado de los cultivos, las características del suelo, la disponibilidad hídrica y múltiples variables relacionadas con la producción agrícola. Según Klerkx et al. (2019), esta disponibilidad de información en tiempo real permite abandonar enfoques reactivos para adoptar estrategias predictivas sustentadas en evidencia, favoreciendo una agricultura capaz de anticipar problemas antes de que afecten significativamente la productividad.

En este escenario, la conectividad se convierte en el elemento integrador de todo el ecosistema digital. El Internet de las Cosas (IoT) permite establecer comunicación permanente entre sensores, equipos agrícolas, plataformas digitales

y sistemas de gestión, facilitando la transmisión automática de información y el monitoreo remoto de las explotaciones agroalimentarias. Ayaz et al. (2019) señalan que esta conectividad constituye la base sobre la cual se desarrollan los sistemas agrícolas inteligentes, ya que posibilita la automatización de procesos y el intercambio continuo de información entre los diferentes componentes del sistema productivo. Complementariamente, Navarro et al. (2020) destacan que la interoperabilidad entre dispositivos favorece la generación de redes agrícolas inteligentes capaces de optimizar la utilización de recursos mediante decisiones sustentadas en información actualizada y contextualizada.

Sin embargo, el verdadero potencial de la convergencia tecnológica no reside únicamente en la capacidad para recopilar grandes volúmenes de datos, sino en la posibilidad de transformarlos en conocimiento útil para la gestión agrícola. En este contexto, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático representan componentes estratégicos, ya que permiten identificar patrones complejos, desarrollar modelos predictivos y generar recomendaciones específicas para apoyar la toma de decisiones. Liakos et al. (2018) sostienen que estas herramientas incrementan la precisión de las intervenciones agrícolas al analizar simultáneamente múltiples variables relacionadas con clima, suelo, rendimiento y manejo de cultivos. En la misma línea, Benos et al. (2021) demuestran que la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial facilita la detección temprana de enfermedades, la predicción del rendimiento agrícola y la optimización de programas de riego y fertilización, contribuyendo a reducir la incertidumbre inherente a los sistemas productivos.

La evolución tecnológica también ha favorecido el desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión cada vez más sofisticados. En lugar de limitarse a registrar información, las plataformas actuales integran modelos analíticos capaces de interpretar automáticamente los datos generados durante la producción agrícola y transformarlos en recomendaciones operativas. Klerkx et al. (2019) destacan que estos sistemas constituyen uno de los avances más relevantes de la agricultura digital, ya que permiten combinar información técnica, ambiental y económica para respaldar decisiones relacionadas con planificación, manejo de cultivos y utilización eficiente de los recursos. De esta manera, la gestión agrícola evoluciona desde modelos basados principalmente en la experiencia hacia procesos de decisión sustentados en evidencia científica y análisis automatizado.

Paralelamente, la integración de estas tecnologías ha impulsado la evolución de los tradicionales Farm Management Information Systems (FMIS) hacia plataformas digitales más completas e interconectadas. Inicialmente concebidos como herramientas para registrar actividades agrícolas, estos sistemas han evolucionado hasta convertirse en entornos integrales capaces de centralizar información relacionada con producción, maquinaria, inventarios, recursos humanos, costos, monitoreo ambiental y planificación estratégica. Fountas et al. (2020) señalan que esta integración favorece una visión sistémica de la explotación agroalimentaria, mejorando la coordinación entre las diferentes áreas funcionales de la empresa y fortaleciendo la capacidad para tomar decisiones fundamentadas en información confiable y actualizada.

Otro aspecto que ha cobrado creciente relevancia corresponde a la gestión integrada de los datos agrícolas. La convergencia entre sensores inteligentes, plataformas analíticas y sistemas de información ha incrementado exponencialmente la cantidad de datos generados durante las actividades productivas. No obstante, el verdadero desafío ya no consiste únicamente en recopilar información, sino en garantizar su calidad, integración e interpretación para convertirla en un recurso estratégico. Bacco et al. (2019) destacan que el éxito de la Agricultura Inteligente depende de la capacidad para articular infraestructuras digitales robustas con herramientas analíticas que permitan procesar grandes volúmenes de datos y transformarlos en conocimiento útil para la gestión empresarial. Desde esta perspectiva, la información deja de constituir un subproducto de la producción agrícola para convertirse en uno de los principales activos que sustentan la competitividad de las organizaciones agroalimentarias.

La convergencia tecnológica también ha impulsado una profunda transformación de las cadenas de suministro agroalimentarias. Tradicionalmente, los diferentes actores que participan en la producción, procesamiento, distribución y comercialización de alimentos operaban mediante sistemas de información independientes, lo que dificultaba el intercambio oportuno de datos y reducía la capacidad de respuesta frente a cambios en la demanda o problemas asociados con la calidad de los productos. La incorporación de plataformas digitales ha permitido superar

progresivamente estas limitaciones al facilitar la integración de información a lo largo de toda la cadena de valor. Verdouw et al. (2021) sostienen que la digitalización de las cadenas agroalimentarias favorece una coordinación más eficiente entre productores, industrias procesadoras, distribuidores y consumidores, fortaleciendo la trazabilidad, la transparencia y la seguridad alimentaria mediante el intercambio continuo de información.

La trazabilidad constituye uno de los principales beneficios derivados de esta transformación. La posibilidad de registrar digitalmente cada etapa del proceso productivo permite conocer el origen de los productos, documentar las prácticas agrícolas empleadas, verificar el cumplimiento de estándares de calidad e identificar con rapidez posibles incidencias sanitarias o logísticas. En consecuencia, la información deja de cumplir únicamente una función administrativa para convertirse en un mecanismo estratégico que fortalece la confianza entre productores, consumidores y organismos reguladores. Este proceso adquiere una importancia creciente en mercados internacionales donde la transparencia y la sostenibilidad constituyen requisitos cada vez más relevantes para la comercialización de productos agroalimentarios (European Commission, 2020).

Desde una perspectiva empresarial, la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente también modifica profundamente los mecanismos de generación de valor. En los modelos tradicionales, la competitividad dependía principalmente de factores como la disponibilidad de tierra, maquinaria o capacidad productiva. Sin embargo, en los ecosistemas digitales contemporáneos, la ventaja competitiva está cada vez más asociada a la capacidad para gestionar información, integrar tecnologías y transformar los datos en conocimiento estratégico. Frank et al. (2019) destacan que la Industria 4.0 redefine los procesos de creación de valor al situar la información, la innovación y el aprendizaje organizacional como activos fundamentales para el desarrollo empresarial. En el ámbito agroalimentario, esta evolución permite optimizar procesos, anticipar riesgos y responder con mayor rapidez a las exigencias del mercado.

Esta transformación también favorece la construcción de organizaciones más flexibles y adaptativas. La disponibilidad de información en tiempo real permite modificar estrategias productivas conforme cambian las condiciones ambientales, climáticas o comerciales, reduciendo la incertidumbre que históricamente ha caracterizado a la actividad agrícola. La utilización de modelos predictivos facilita la planificación de siembras, la programación del riego, la optimización de cosechas y la gestión eficiente de insumos, fortaleciendo la capacidad de adaptación de las empresas frente a escenarios cada vez más dinámicos. Como señalan Klerkx et al. (2019), la agricultura basada en datos representa un cambio de paradigma donde la anticipación sustituye progresivamente a la reacción como principio de gestión.

No obstante, la creciente integración de tecnologías digitales también plantea desafíos que condicionan la consolidación de estos ecosistemas inteligentes. Uno de los más relevantes corresponde a la interoperabilidad entre plataformas, equipos y sistemas desarrollados por diferentes fabricantes. La ausencia de estándares comunes dificulta el intercambio eficiente de información, limita la integración entre dispositivos y reduce el potencial de las soluciones digitales para generar una gestión verdaderamente integral. Fountas et al. (2020) advierten que la fragmentación tecnológica continúa siendo uno de los principales obstáculos para el desarrollo de sistemas agrícolas plenamente interconectados, situación que exige avanzar hacia protocolos abiertos y arquitecturas tecnológicas compatibles.

De manera complementaria, la rápida expansión de los sistemas digitales ha incrementado la importancia de la gobernanza de los datos. La información generada por sensores, maquinaria inteligente, plataformas analíticas y aplicaciones móviles constituye un recurso estratégico cuya propiedad, acceso y utilización requieren criterios claros de transparencia, seguridad y responsabilidad. La European Commission (2020) subraya que la consolidación de la Agricultura Inteligente debe sustentarse en principios que garanticen la protección de los datos, la interoperabilidad entre plataformas y el uso ético de la inteligencia artificial, promoviendo entornos digitales donde los productores mantengan el control sobre la información derivada de sus actividades productivas.

A estos retos se suman las crecientes exigencias relacionadas con la ciberseguridad. La interconexión permanente entre dispositivos, plataformas en la nube y sistemas de gestión incrementa la exposición a riesgos asociados con accesos no autorizados, pérdida de información o interrupciones operativas. Bacco et al. (2019) destacan que el

fortalecimiento de las infraestructuras digitales debe acompañarse de mecanismos robustos de protección informática capaces de garantizar la integridad, disponibilidad y confidencialidad de los datos agrícolas. En consecuencia, la seguridad digital deja de ser un componente exclusivamente tecnológico para convertirse en un elemento estratégico de la gestión empresarial y de la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios inteligentes.

Estas consideraciones adquieren una relevancia particular para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias. La convergencia tecnológica representa, simultáneamente, una oportunidad para acceder a herramientas que incrementan la productividad y un desafío asociado con la necesidad de desarrollar capacidades organizacionales que permitan integrar dichas tecnologías dentro de modelos de gestión eficientes. La progresiva disponibilidad de soluciones basadas en computación en la nube, aplicaciones móviles y servicios digitales está reduciendo parcialmente las barreras de acceso a la innovación; sin embargo, el aprovechamiento de estas herramientas continúa dependiendo de factores relacionados con infraestructura, capacitación, inversión y planificación estratégica. Como señalan Jha et al. (2019), la transformación digital solo genera ventajas competitivas sostenibles cuando la adopción tecnológica se acompaña de procesos de fortalecimiento organizacional y desarrollo de capacidades.

En síntesis, la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente constituye una transformación estructural que trasciende la incorporación de tecnologías individuales para configurar ecosistemas digitales capaces de integrar información, automatización e inteligencia computacional dentro de un mismo sistema productivo. Este proceso redefine la organización de las cadenas agroalimentarias, modifica los mecanismos tradicionales de generación de valor y fortalece la capacidad de adaptación de las organizaciones frente a un entorno caracterizado por la innovación permanente. Para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, comprender esta convergencia resulta esencial, ya que constituye el fundamento sobre el cual pueden desarrollarse nuevos modelos de gestión, innovación y competitividad. Precisamente, estas implicaciones organizacionales y estratégicas se analizan con mayor profundidad en el apartado siguiente, dedicado a la transformación digital de las PYMES agroalimentarias.

3.3. Transformación digital de las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) agroalimentarias constituyen uno de los principales motores del desarrollo económico y social en numerosos países, debido a su contribución a la producción de alimentos, la generación de empleo y la dinamización de las economías rurales. Sin embargo, estas organizaciones operan en un entorno caracterizado por crecientes exigencias de competitividad, sostenibilidad, trazabilidad e innovación, lo que ha convertido a la transformación digital en un factor estratégico para garantizar su permanencia y crecimiento. En este contexto, la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente ofrece nuevas posibilidades para modernizar los procesos productivos, fortalecer la eficiencia operativa y mejorar la capacidad de respuesta frente a mercados cada vez más dinámicos y globalizados. Como señalan Frank et al. (2019), la digitalización constituye mucho más que una innovación tecnológica; representa una transformación estructural de los modelos de gestión empresarial basada en la integración inteligente de información, tecnología y conocimiento.

Desde esta perspectiva, la transformación digital no debe interpretarse únicamente como la incorporación de equipos, sensores o plataformas tecnológicas dentro de las organizaciones. Se trata de un proceso de cambio organizacional que modifica la manera en que las empresas planifican sus actividades, administran recursos, interactúan con clientes y proveedores, desarrollan procesos de innovación y generan ventajas competitivas sostenibles. La digitalización implica que la información se convierta en un activo estratégico para la toma de decisiones, sustituyendo progresivamente modelos de gestión fundamentados exclusivamente en la experiencia por esquemas respaldados por evidencia obtenida en tiempo real. Este cambio exige transformar no solo la infraestructura tecnológica, sino también la cultura organizacional y las capacidades internas de las empresas (European Commission, 2020).

Uno de los cambios más significativos derivados de este proceso corresponde a la evolución desde organizaciones orientadas a procesos aislados hacia empresas sustentadas en ecosistemas digitales integrados. La utilización de plataformas inteligentes permite centralizar información relacionada con producción, inventarios, logística, mantenimiento, comercialización, recursos humanos y gestión financiera dentro de un único entorno tecnológico. Esta integración favorece una visión sistémica del funcionamiento empresarial, incrementando la coordinación entre las

diferentes áreas y facilitando procesos de planificación más eficientes. Fountas et al. (2020) destacan que los sistemas integrados de gestión agrícola constituyen uno de los principales pilares de la agricultura digital al proporcionar información consolidada que fortalece la capacidad de análisis y la coordinación de las actividades productivas.

La disponibilidad de información en tiempo real ha transformado igualmente los procesos de toma de decisiones dentro de las PYMES agroalimentarias. Tradicionalmente, la planificación de actividades agrícolas dependía en gran medida de registros históricos, estimaciones generales o del conocimiento empírico acumulado por los productores. Actualmente, la incorporación de sensores inteligentes, plataformas analíticas e imágenes satelitales permite fundamentar las decisiones en indicadores objetivos relacionados con rendimiento de cultivos, condiciones ambientales, disponibilidad de recursos y comportamiento del mercado. Klerkx et al. (2019) sostienen que la capacidad para convertir datos en conocimiento representa uno de los principales factores diferenciadores de las empresas que logran incorporar exitosamente la transformación digital dentro de sus estrategias de gestión.

Esta evolución ha impulsado igualmente una nueva forma de comprender la innovación empresarial. Mientras que los modelos tradicionales asociaban la innovación principalmente con la adquisición de maquinaria o infraestructura física, los ecosistemas digitales contemporáneos incorporan procesos continuos de innovación basados en inteligencia artificial, análisis predictivo, automatización, plataformas colaborativas y servicios digitales. En consecuencia, la innovación deja de depender exclusivamente de inversiones en activos tangibles para sustentarse cada vez más en la capacidad de gestionar información, desarrollar conocimiento y adaptarse rápidamente a nuevas condiciones productivas. Como señalan Frank et al. (2019), la Industria 4.0 favorece organizaciones más flexibles, donde el aprendizaje permanente y la gestión del conocimiento constituyen componentes esenciales de la competitividad empresarial.

Otro aspecto que ha experimentado una transformación significativa corresponde a la relación entre las PYMES agroalimentarias y los diferentes actores de la cadena de valor. La digitalización facilita el intercambio continuo de información con proveedores, distribuidores, organismos reguladores y consumidores, fortaleciendo la coordinación logística, la trazabilidad de los productos y la transparencia de los procesos comerciales. Verdouw et al. (2021) destacan que la integración digital de las cadenas agroalimentarias permite reducir ineficiencias, mejorar la coordinación entre los distintos eslabones y aumentar la capacidad de respuesta frente a cambios en la demanda o problemas relacionados con la calidad de los alimentos.

La convergencia tecnológica también ha fortalecido la capacidad de las pequeñas empresas para participar en redes colaborativas de innovación. La utilización de plataformas digitales facilita el intercambio de información entre productores, instituciones de investigación, empresas tecnológicas y organismos públicos, favoreciendo procesos de aprendizaje colectivo y acelerando la transferencia de conocimiento hacia el sector productivo. Esta cooperación resulta especialmente relevante para las PYMES, que frecuentemente disponen de recursos limitados para desarrollar procesos propios de investigación e innovación. En este sentido, FAO (2022) destaca que la colaboración entre los diferentes actores del ecosistema agroalimentario constituye uno de los factores que mayor impacto tendrá en la consolidación de la transformación digital durante los próximos años.

Desde una perspectiva estratégica, la transformación digital también modifica los criterios mediante los cuales las empresas construyen ventajas competitivas. La competitividad deja de depender exclusivamente de la escala de producción o de la disponibilidad de recursos físicos y pasa a sustentarse en la capacidad para interpretar información, incorporar tecnologías inteligentes y responder con rapidez a las necesidades del mercado. En consecuencia, las PYMES agroalimentarias que desarrollan capacidades digitales fortalecen simultáneamente su productividad, capacidad de innovación y resiliencia frente a escenarios de incertidumbre económica y climática. Jha et al. (2019) señalan que la integración de tecnologías digitales permite mejorar significativamente la eficiencia productiva y ampliar las oportunidades de inserción en mercados caracterizados por mayores exigencias de calidad, sostenibilidad y trazabilidad.

A pesar de los múltiples beneficios asociados con la digitalización, la transformación tecnológica de las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias continúa enfrentando importantes limitaciones estructurales. A diferencia de las

grandes corporaciones, estas organizaciones suelen operar con recursos financieros restringidos, estructuras administrativas reducidas y limitada capacidad para asumir procesos de innovación de largo plazo. Esta realidad condiciona la velocidad con la que pueden incorporar tecnologías avanzadas y dificulta la consolidación de estrategias digitales sostenibles. En consecuencia, la adopción tecnológica no depende exclusivamente de la disponibilidad de soluciones digitales, sino también de la capacidad organizacional para integrarlas de manera efectiva dentro de los procesos empresariales. Como señalan Shafi et al. (2019), las características propias de las PYMES exigen modelos de transformación digital adaptados a sus condiciones económicas, técnicas y organizacionales.

Entre las principales limitaciones destaca la insuficiente disponibilidad de infraestructura tecnológica. En numerosas regiones rurales persisten deficiencias relacionadas con la conectividad a internet, la cobertura de redes móviles, el acceso a servicios de computación en la nube y la disponibilidad de equipos especializados. Estas restricciones limitan el funcionamiento de sistemas basados en Internet de las Cosas, plataformas de monitoreo remoto e inteligencia artificial, reduciendo significativamente las posibilidades de aprovechar el potencial de la Agricultura Inteligente. La European Commission (2020) reconoce que el desarrollo de infraestructuras digitales constituye una condición indispensable para garantizar una transformación tecnológica inclusiva y territorialmente equilibrada.

Otro desafío relevante corresponde al desarrollo del capital humano. La incorporación de tecnologías inteligentes exige competencias que trascienden el conocimiento tradicional de las actividades agrícolas e incluyen habilidades relacionadas con la gestión de datos, el análisis de información, la utilización de plataformas digitales y la interpretación de indicadores productivos. La ausencia de estas capacidades limita la apropiación efectiva de las innovaciones y puede provocar que las inversiones tecnológicas no generen los resultados esperados. En este sentido, Klerkx et al. (2019) destacan que la formación continua de productores, técnicos y directivos constituye uno de los factores más determinantes para asegurar el éxito de la agricultura digital, ya que las tecnologías solo generan valor cuando son utilizadas estratégicamente por personas con las competencias adecuadas.

La resistencia al cambio organizacional representa igualmente un factor que condiciona la transformación digital. La introducción de nuevos modelos de gestión implica modificar rutinas de trabajo, redefinir responsabilidades y adoptar procesos de decisión sustentados en evidencia, aspectos que pueden generar incertidumbre dentro de organizaciones acostumbradas a métodos tradicionales de producción. La digitalización, por tanto, debe entenderse como un proceso de cambio cultural que requiere liderazgo, comunicación efectiva y participación activa de todos los actores involucrados. Frank et al. (2019) sostienen que las organizaciones que integran exitosamente la Industria 4.0 son aquellas que desarrollan simultáneamente capacidades tecnológicas y capacidades organizacionales, evitando reducir la innovación a una simple modernización del equipamiento.

Las restricciones económicas constituyen otra de las barreras más frecuentes para las PYMES agroalimentarias. La adquisición de sensores inteligentes, drones, maquinaria automatizada, plataformas analíticas o sistemas de gestión digital suele representar inversiones significativas que muchas empresas no pueden asumir sin apoyo externo. Además de los costos iniciales, deben considerarse gastos relacionados con mantenimiento, actualización tecnológica, capacitación del personal y soporte especializado. Klerkx et al. (2019) evidencia que estas limitaciones financieras continúan siendo uno de los principales obstáculos para la adopción de tecnologías de Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas latinoamericanas, particularmente cuando no existen políticas públicas que faciliten el acceso a incentivos o mecanismos de financiamiento.

A estas dificultades se suman desafíos relacionados con la integración tecnológica. Muchas empresas incorporan herramientas digitales de manera aislada, sin una estrategia integral que permita conectar los distintos procesos organizacionales. Como consecuencia, se generan sistemas fragmentados que dificultan el intercambio de información y reducen el potencial de las tecnologías para optimizar la gestión empresarial. Bacco et al. (2019) señalan que la verdadera transformación digital requiere plataformas interoperables capaces de integrar datos provenientes de múltiples fuentes y convertirlos en información útil para apoyar la toma de decisiones estratégicas.

No obstante, diversos estudios coinciden en que estas limitaciones no constituyen barreras insuperables. La creciente disponibilidad de soluciones digitales basadas en servicios en la nube, aplicaciones móviles y modelos de software

como servicio (SaaS) está reduciendo progresivamente los costos de incorporación tecnológica, facilitando el acceso de las PYMES a herramientas que anteriormente estaban reservadas para grandes empresas. Paralelamente, el desarrollo de ecosistemas colaborativos entre universidades, centros de investigación, organismos gubernamentales y empresas tecnológicas favorece procesos de transferencia de conocimiento e innovación abierta que fortalecen las capacidades del sector agroalimentario. FAO (2022) destaca que la cooperación institucional constituye uno de los principales mecanismos para acelerar la digitalización de las pequeñas explotaciones agrícolas y reducir las brechas tecnológicas existentes.

En este escenario, la competitividad futura de las PYMES agroalimentarias dependerá cada vez menos del tamaño de la empresa y cada vez más de su capacidad para aprender, innovar y adaptarse a los cambios tecnológicos. La digitalización ofrece oportunidades para incrementar la eficiencia productiva, mejorar la calidad de los alimentos, fortalecer la sostenibilidad ambiental y acceder a nuevos mercados; sin embargo, estos beneficios solo podrán materializarse plenamente cuando las organizaciones desarrollen capacidades estratégicas que integren tecnología, conocimiento y gestión empresarial. Como sostienen Jha et al. (2019), la transformación digital debe entenderse como un proceso continuo de innovación organizacional que exige inversión permanente en infraestructura, talento humano y aprendizaje institucional.

En consecuencia, la transformación digital de las PYMES agroalimentarias no constituye un objetivo en sí mismo, sino un medio para fortalecer la resiliencia, la sostenibilidad y la competitividad de las organizaciones frente a un entorno económico caracterizado por la incertidumbre, la rápida evolución tecnológica y las crecientes exigencias de los consumidores. Sobre esta base, resulta pertinente analizar las oportunidades específicas que ofrece la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente para impulsar el desarrollo competitivo del sector agroalimentario, aspecto que se aborda en el apartado siguiente.

3.4. Oportunidades derivadas de la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente

La convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente ha abierto un amplio conjunto de oportunidades para transformar los sistemas agroalimentarios mediante la incorporación de tecnologías capaces de incrementar la eficiencia, la sostenibilidad y la competitividad empresarial. Más allá de la automatización de procesos específicos, esta transformación favorece la construcción de modelos productivos sustentados en el análisis continuo de datos, la toma de decisiones basada en evidencia y la integración inteligente de todos los componentes de la cadena agroalimentaria. En este contexto, las pequeñas y medianas empresas encuentran nuevas posibilidades para fortalecer su capacidad de innovación y responder de manera más efectiva a un entorno caracterizado por rápidos cambios tecnológicos y crecientes exigencias del mercado. Como señalan Frank et al. (2019), la Industria 4.0 representa un cambio de paradigma que redefine la forma en que las organizaciones crean valor, gestionan el conocimiento y desarrollan ventajas competitivas sostenibles.

Una de las oportunidades más relevantes corresponde al incremento de la eficiencia productiva. La integración de sensores inteligentes, plataformas analíticas, sistemas de posicionamiento global, imágenes satelitales e inteligencia artificial permite optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes, energía y agroquímicos, reduciendo desperdicios sin comprometer los niveles de producción. Esta gestión de precisión favorece intervenciones específicas según las necesidades reales de cada cultivo, mejorando simultáneamente el rendimiento agrícola y la sostenibilidad ambiental. Jha et al. (2019) destacan que la agricultura de precisión constituye uno de los principales aportes de la digitalización al permitir decisiones más exactas, oportunas y eficientes durante todas las etapas del proceso productivo.

La disponibilidad de información en tiempo real constituye otra ventaja estratégica derivada de la convergencia tecnológica. La captura permanente de datos mediante dispositivos conectados permite monitorear continuamente variables relacionadas con humedad del suelo, condiciones climáticas, desarrollo de los cultivos, estado nutricional de las plantas y funcionamiento de la maquinaria agrícola. Esta información favorece la detección temprana de anomalías y la implementación de acciones preventivas antes de que los problemas afecten significativamente la productividad.

Klerkx et al. (2019) sostienen que la capacidad para transformar datos en conocimiento constituye uno de los principales factores que explican el incremento de la eficiencia observado en los sistemas agrícolas digitalizados.

La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial amplía aún más estas posibilidades al facilitar el desarrollo de modelos predictivos capaces de anticipar riesgos asociados con enfermedades, plagas, estrés hídrico o variaciones climáticas. Mediante técnicas de aprendizaje automático es posible analizar simultáneamente grandes volúmenes de información procedentes de múltiples fuentes y generar recomendaciones específicas para optimizar las decisiones agrícolas. Liakos et al. (2018) destacan que estas herramientas incrementan significativamente la precisión de la gestión agrícola al reducir la incertidumbre inherente a los procesos biológicos y ambientales. De manera complementaria, Benos et al. (2021) evidencian que la inteligencia artificial mejora la eficiencia de los programas de riego, fertilización y manejo fitosanitario, favoreciendo sistemas productivos más sostenibles y rentables.

Otra oportunidad de gran relevancia corresponde al fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental. La utilización eficiente de insumos agrícolas contribuye a disminuir el consumo de agua, reducir las emisiones derivadas del uso excesivo de fertilizantes y minimizar el impacto ambiental asociado con las prácticas agrícolas convencionales. La Agricultura Inteligente favorece un uso más racional de los recursos naturales mediante intervenciones basadas en información específica para cada unidad productiva, contribuyendo simultáneamente a la conservación de los ecosistemas y al incremento de la productividad. La European Commission (2020) destaca que la digitalización representa uno de los pilares fundamentales para avanzar hacia sistemas agroalimentarios compatibles con los objetivos de sostenibilidad establecidos por la Unión Europea.

Desde el punto de vista económico, la convergencia tecnológica también favorece una utilización más eficiente de los recursos financieros. La reducción de pérdidas, la optimización de insumos, la automatización de procesos y el incremento del rendimiento productivo generan mejoras en la rentabilidad empresarial, particularmente cuando las tecnologías son implementadas dentro de estrategias integrales de gestión. Aunque la incorporación inicial de herramientas digitales puede requerir inversiones importantes, diversos estudios coinciden en que los beneficios derivados de la mayor eficiencia operativa compensan progresivamente dichos costos mediante reducciones sostenidas de gastos de producción y mejoras en la productividad. Klerkx et al. (2019) destacan que la agricultura digital permite incrementar el retorno de las inversiones al optimizar la asignación de recursos y fortalecer la capacidad para tomar decisiones estratégicas fundamentadas en evidencia.

La digitalización también fortalece la capacidad de adaptación de las empresas frente a escenarios de incertidumbre. El cambio climático, la volatilidad de los mercados internacionales, las fluctuaciones en los costos de producción y las nuevas exigencias regulatorias demandan organizaciones capaces de responder rápidamente a condiciones cambiantes. En este sentido, la disponibilidad de sistemas inteligentes de monitoreo y análisis facilita la identificación temprana de riesgos y la implementación de estrategias preventivas que fortalecen la resiliencia empresarial. Como señalan Bacco et al. (2019), la integración de infraestructuras digitales permite desarrollar sistemas agrícolas más flexibles, donde la información constituye el principal recurso para gestionar la incertidumbre y mejorar la capacidad de respuesta organizacional.

Finalmente, la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente impulsa una cultura de innovación permanente dentro de las organizaciones. La incorporación continua de nuevas tecnologías, el aprendizaje organizacional y el uso estratégico de la información favorecen procesos de mejora continua que incrementan la competitividad empresarial en el largo plazo. La innovación deja de depender exclusivamente de inversiones en infraestructura física y pasa a sustentarse en la capacidad para generar conocimiento, incorporar tecnologías emergentes y transformar la información en decisiones estratégicas. Esta evolución resulta especialmente relevante para las PYMES agroalimentarias, ya que les permite competir en mercados cada vez más exigentes mediante modelos de gestión más ágiles, eficientes y orientados al conocimiento.

Otra oportunidad significativa generada por la convergencia tecnológica corresponde al fortalecimiento de la trazabilidad agroalimentaria. La incorporación de sensores inteligentes, plataformas digitales y sistemas de información integrados permite registrar de manera continua cada etapa del proceso productivo, desde la preparación

del suelo hasta la distribución del producto final. Esta capacidad facilita el seguimiento detallado de los alimentos, mejora los controles de calidad y fortalece la transparencia en toda la cadena de suministro. Como señalan Verdouw et al. (2021), la digitalización de las cadenas agroalimentarias incrementa la confiabilidad de la información compartida entre los diferentes actores, reduciendo riesgos asociados con errores logísticos, pérdidas de productos y problemas sanitarios.

La mejora de la trazabilidad adquiere especial importancia en un contexto donde los consumidores demandan cada vez mayor información sobre el origen, la calidad y la sostenibilidad de los alimentos que adquieren. La posibilidad de documentar digitalmente las prácticas agrícolas, el uso de insumos, las condiciones de producción y los procesos de transporte fortalece la confianza de los consumidores y facilita el cumplimiento de estándares nacionales e internacionales de calidad. En este sentido, la European Commission (2020) destaca que la digitalización constituye un instrumento esencial para garantizar la seguridad alimentaria, promover la transparencia del mercado y respaldar sistemas de certificación cada vez más exigentes.

La transformación digital también amplía las oportunidades de inserción en mercados internacionales. La creciente globalización del comercio agroalimentario exige a las empresas demostrar el cumplimiento de requisitos relacionados con inocuidad, sostenibilidad, trazabilidad y responsabilidad ambiental. Las tecnologías digitales facilitan la generación automática de registros productivos, la documentación de procesos y la disponibilidad de información verificable para clientes, organismos certificadores y autoridades regulatorias. Como consecuencia, las PYMES que incorporan herramientas digitales fortalecen su capacidad para competir en mercados donde la información confiable constituye un factor determinante para acceder a cadenas globales de valor.

Otro beneficio estratégico corresponde al fortalecimiento de la innovación abierta. La digitalización favorece la creación de redes colaborativas entre empresas, universidades, centros de investigación, organismos públicos y proveedores tecnológicos, facilitando el intercambio de conocimientos, experiencias y soluciones innovadoras. Este tipo de cooperación resulta particularmente relevante para las pequeñas y medianas empresas, que generalmente disponen de recursos limitados para desarrollar investigación y desarrollo de manera independiente. FAO (2022) sostiene que los ecosistemas colaborativos representan uno de los principales motores de la innovación agrícola europea, al acelerar la transferencia tecnológica y facilitar la adopción de soluciones digitales adaptadas a diferentes contextos productivos.

En este escenario, la información se consolida como un recurso estratégico para el desarrollo de nuevos modelos de negocio. La capacidad para analizar grandes volúmenes de datos permite identificar patrones de consumo, anticipar tendencias del mercado y diseñar estrategias comerciales más eficientes. Asimismo, la digitalización facilita el desarrollo de servicios complementarios relacionados con asesoría técnica, monitoreo remoto, mantenimiento predictivo y comercialización inteligente, ampliando las oportunidades de generación de valor más allá de la producción primaria. Como destacan Frank et al. (2019), la Industria 4.0 redefine las fuentes tradicionales de competitividad al situar la gestión del conocimiento y la innovación como elementos centrales de la estrategia empresarial.

La convergencia entre tecnologías digitales también favorece una utilización más eficiente de los recursos humanos. La automatización de tareas repetitivas permite que productores y técnicos concentren sus esfuerzos en actividades de mayor valor agregado, como la planificación estratégica, el análisis de información y la toma de decisiones. Esta redistribución del trabajo incrementa la productividad organizacional y fortalece la capacidad de adaptación frente a entornos cada vez más complejos. No obstante, esta evolución exige procesos permanentes de capacitación y actualización profesional para garantizar que el talento humano pueda aprovechar plenamente las posibilidades ofrecidas por las nuevas tecnologías (Klerkx et al., 2019).

Desde una perspectiva territorial, la digitalización ofrece igualmente oportunidades para reducir brechas históricas entre zonas rurales y urbanas. La disponibilidad de plataformas digitales, aplicaciones móviles y servicios basados en la nube facilita el acceso de los productores a información técnica, mercados, asistencia especializada y programas de capacitación sin depender exclusivamente de la proximidad geográfica a centros urbanos. Esta democratización del

acceso al conocimiento contribuye a fortalecer el desarrollo rural, incrementar la productividad de pequeñas explotaciones y promover sistemas agroalimentarios más inclusivos y resilientes. Jha et al. (2019) destacan que la expansión de las tecnologías digitales constituye un elemento clave para impulsar procesos de desarrollo agrícola sostenible en economías emergentes.

Finalmente, la principal oportunidad derivada de la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente reside en la posibilidad de construir organizaciones más resilientes, sostenibles y orientadas por datos. La integración de tecnologías inteligentes no solo mejora indicadores de productividad, sino que fortalece la capacidad de adaptación frente a cambios climáticos, fluctuaciones económicas y nuevas exigencias regulatorias. La combinación de inteligencia artificial, Internet de las Cosas, automatización y análisis de datos permite desarrollar modelos empresariales caracterizados por una mayor capacidad de aprendizaje, innovación y respuesta ante escenarios inciertos. Como concluyen Klerkx et al. (2019), la agricultura basada en datos representa una transformación estructural que redefine la manera en que las organizaciones producen, gestionan recursos y generan valor en el sector agroalimentario.

En síntesis, las oportunidades derivadas de la convergencia tecnológica trascienden la simple incorporación de herramientas digitales y configuran un nuevo paradigma de gestión empresarial basado en información, innovación y sostenibilidad. Para las PYMES agroalimentarias, estas oportunidades representan una vía para incrementar su competitividad, fortalecer su integración en cadenas globales de valor y responder con mayor eficacia a los desafíos económicos, sociales y ambientales del siglo XXI. No obstante, el aprovechamiento efectivo de este potencial depende de la capacidad para superar diversas limitaciones estructurales y organizacionales, las cuales se analizan en el apartado siguiente.

Tabla 1.

Principales oportunidades derivadas de la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente para las PYMES agroalimentarias

Oportunidad	Impacto esperado	Principales referencias
Incremento de la competitividad	Fortalecimiento del posicionamiento empresarial mediante decisiones basadas en datos, innovación continua y optimización de los procesos productivos.	Frank et al. (2019); European Commission (2020)
Optimización de la productividad y eficiencia operativa	Incremento del rendimiento agrícola mediante agricultura de precisión, automatización y monitoreo inteligente de las operaciones.	Klerkx et al. (2019); Liakos et al. (2018); Jha et al. (2019)
Gestión inteligente de recursos	Uso eficiente de agua, energía, fertilizantes e insumos agrícolas, reduciendo costos operativos y el impacto ambiental.	Ayaz et al. (2019); Klerkx et al. (2019)
Trazabilidad y transparencia agroalimentaria	Mayor control de calidad, seguridad alimentaria y confianza de consumidores, distribuidores y organismos reguladores mediante el seguimiento digital de la producción.	Verdouw et al. (2021); European Commission (2020)
Transformación digital e innovación organizacional	Modernización de la gestión empresarial mediante la integración de plataformas digitales, análisis de datos y mejora continua de los procesos.	Frank et al. (2019); Fountas et al. (2020); Bacco et al. (2019)
Acceso a mercados nacionales e internacionales	Cumplimiento de estándares de calidad, sostenibilidad y certificación que facilitan la inserción en cadenas globales de valor y mercados de mayor exigencia.	European Commission (2020); IFPRI (2023)
Sostenibilidad y economía circular	Reducción del desperdicio de recursos, aprovechamiento eficiente de insumos y fortalecimiento de sistemas productivos ambientalmente sostenibles.	European Commission (2020); FAO (2022)

Oportunidad	Impacto esperado	Principales referencias
Resiliencia y capacidad adaptativa	Mayor capacidad para anticipar y responder a riesgos climáticos, económicos y de mercado mediante tecnologías inteligentes de monitoreo y análisis predictivo.	IFPRI (2023); Klerkx et al. (2019); Bacco et al. (2019)

Fuente. Elaboración propia a partir de Frank et al. (2019), Fountas et al. (2020), Verdouw et al. (2021), Klerkx et al. (2019), Liakos et al. (2018), Ayaz et al. (2019), Klerkx et al. (2019), Bacco et al. (2019), Jha et al. (2019), FAO (2022), IFPRI (2023) y European Commission (2020).

3.5. Barreras y desafíos para la implementación de la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente en las PYMES agroalimentarias

A pesar del amplio potencial que ofrece la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente, su adopción en las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias continúa siendo desigual. Mientras algunas organizaciones han logrado incorporar exitosamente tecnologías digitales dentro de sus procesos productivos, un número considerable de PYMES enfrenta dificultades para avanzar hacia modelos de gestión basados en información, automatización e inteligencia artificial. Esta situación evidencia que la disponibilidad de tecnologías no garantiza, por sí sola, una transformación digital efectiva, ya que dicha transformación depende de la interacción entre factores económicos, tecnológicos, organizacionales, institucionales y sociales. Como señalan Frank et al. (2019), la digitalización constituye un proceso sistémico que requiere la articulación simultánea de capacidades técnicas, recursos financieros y estrategias organizacionales.

Una de las principales barreras corresponde a las limitaciones económicas. La incorporación de sensores inteligentes, drones, plataformas analíticas, sistemas de inteligencia artificial o maquinaria automatizada exige inversiones que, para muchas PYMES agroalimentarias, resultan difíciles de asumir debido a su limitada capacidad financiera. Además de los costos iniciales de adquisición, deben considerarse los gastos asociados con mantenimiento, actualización tecnológica, licencias de software, conectividad y capacitación del personal. En consecuencia, numerosas empresas optan por implementar soluciones parciales o posponer sus procesos de modernización, reduciendo las posibilidades de obtener los beneficios derivados de la transformación digital. La Klerkx et al. (2019) identifica precisamente la disponibilidad de recursos financieros como uno de los factores más determinantes para explicar los diferentes niveles de adopción de tecnologías de Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas latinoamericanas.

A estas limitaciones se suma la persistencia de brechas en infraestructura digital, especialmente en zonas rurales donde se concentra gran parte de la producción agroalimentaria. La conectividad insuficiente, la baja cobertura de redes de comunicación, el acceso limitado a servicios en la nube y la escasa disponibilidad de infraestructura tecnológica restringen el funcionamiento eficiente de aplicaciones basadas en Internet de las Cosas, monitoreo remoto o análisis masivo de datos. Estas condiciones generan importantes desigualdades territoriales en el acceso a la innovación, dificultando que las pequeñas empresas aprovechen plenamente las oportunidades ofrecidas por la agricultura digital. La European Commission (2020) reconoce que el fortalecimiento de la infraestructura digital constituye uno de los principales desafíos para consolidar ecosistemas agrícolas inteligentes e inclusivos.

Otra barrera significativa está relacionada con la escasez de competencias digitales. La transformación tecnológica requiere profesionales capaces de interpretar información, administrar plataformas digitales, analizar indicadores productivos y utilizar herramientas de inteligencia artificial para apoyar la toma de decisiones. Sin embargo, muchas PYMES agroalimentarias continúan dependiendo de modelos tradicionales de gestión basados principalmente en la experiencia práctica, sin contar con personal especializado en tecnologías digitales. Esta situación limita la apropiación efectiva de las innovaciones e incrementa el riesgo de implementar tecnologías que finalmente no son aprovechadas en toda su capacidad. Klerkx et al. (2019) destacan que el desarrollo del talento humano constituye un componente tan importante como la inversión tecnológica, ya que el verdadero valor de la digitalización depende de la capacidad de las personas para transformar los datos en decisiones estratégicas.

La resistencia al cambio organizacional representa igualmente un obstáculo frecuente durante los procesos de transformación digital. La incorporación de nuevas tecnologías implica modificar rutinas de trabajo, redefinir responsabilidades, introducir procesos automatizados y adoptar modelos de gestión sustentados en evidencia. Estos cambios pueden generar incertidumbre entre directivos y trabajadores, especialmente cuando no existen estrategias claras de liderazgo, comunicación y capacitación que acompañen la implementación tecnológica. Como sostienen Shafi et al. (2019), la digitalización no debe abordarse únicamente como un proyecto tecnológico, sino como un proceso integral de transformación organizacional que exige construir una cultura favorable a la innovación y al aprendizaje continuo.

A nivel tecnológico, uno de los desafíos más complejos corresponde a la interoperabilidad entre plataformas y dispositivos. La coexistencia de equipos desarrollados por diferentes fabricantes, con protocolos de comunicación incompatibles o formatos de datos distintos, dificulta la integración de la información y limita la construcción de sistemas digitales verdaderamente inteligentes. La ausencia de estándares comunes reduce la eficiencia de las soluciones tecnológicas e incrementa los costos asociados con la integración de plataformas. Fountas et al. (2020) advierten que la fragmentación tecnológica continúa siendo uno de los principales obstáculos para el desarrollo de sistemas agrícolas completamente conectados, capaces de integrar información procedente de múltiples fuentes en tiempo real.

La creciente dependencia de plataformas digitales también incrementa la importancia de la seguridad informática y la gobernanza de los datos. Los sistemas agrícolas inteligentes generan grandes volúmenes de información relacionados con procesos productivos, rendimiento de cultivos, prácticas de manejo y estrategias empresariales, datos que poseen un elevado valor económico y estratégico. La ausencia de mecanismos adecuados para proteger esta información puede generar riesgos asociados con accesos no autorizados, pérdida de datos, vulnerabilidades informáticas o utilización indebida de información sensible. Bacco et al. (2019) destacan que la ciberseguridad y la gestión responsable de los datos constituyen requisitos indispensables para garantizar la confianza y sostenibilidad de los ecosistemas digitales agroalimentarios.

Finalmente, estas barreras no actúan de manera aislada, sino que suelen reforzarse mutuamente. La limitada disponibilidad de recursos financieros dificulta la adquisición de infraestructura tecnológica; la insuficiente infraestructura restringe el acceso a herramientas digitales; la falta de competencias limita su aprovechamiento; y la ausencia de estrategias organizacionales reduce las posibilidades de consolidar procesos sostenibles de innovación. En consecuencia, la transformación digital de las PYMES agroalimentarias debe abordarse mediante estrategias integrales que combinen inversión tecnológica, fortalecimiento institucional, desarrollo de capacidades humanas y políticas públicas orientadas a reducir las brechas existentes entre empresas y territorios.

Además de las limitaciones internas de las empresas, la transformación digital del sector agroalimentario depende en gran medida del entorno institucional y de las políticas públicas que favorezcan la innovación tecnológica. La adopción de herramientas digitales requiere marcos regulatorios que promuevan la inversión, incentivos para la modernización empresarial y estrategias nacionales orientadas al fortalecimiento de la infraestructura digital rural. Cuando estos elementos son insuficientes o presentan un desarrollo desigual, las pequeñas y medianas empresas enfrentan mayores dificultades para incorporar tecnologías avanzadas y sostener procesos continuos de innovación. En este sentido, la European Commission (2020) subraya que la transición hacia una agricultura digital debe apoyarse en políticas integrales que articulen infraestructura, capacitación, financiamiento e innovación como componentes inseparables de una misma estrategia de desarrollo.

Un desafío estrechamente relacionado corresponde al acceso al financiamiento para la innovación. Aunque numerosas tecnologías digitales han reducido progresivamente sus costos, la implementación de proyectos de transformación digital continúa requiriendo inversiones que muchas PYMES no pueden asumir únicamente con recursos propios. La disponibilidad de líneas de crédito especializadas, incentivos fiscales, fondos de innovación y mecanismos de cooperación público-privada resulta determinante para acelerar la incorporación de tecnologías inteligentes dentro del sector agroalimentario. Sin estos instrumentos, existe el riesgo de ampliar las brechas tecnológicas entre empresas

con diferentes capacidades económicas, limitando la democratización de los beneficios asociados con la digitalización (IFPRI, 2023).

La creciente dependencia de plataformas digitales también plantea desafíos relacionados con la propiedad, gestión y gobernanza de los datos agrícolas. La información generada por sensores, drones, estaciones meteorológicas, maquinaria conectada y aplicaciones móviles constituye un activo estratégico cuya utilización debe regirse por principios de transparencia, seguridad y equidad. Sin reglas claras sobre el acceso, almacenamiento y uso de estos datos, pueden surgir conflictos entre productores, proveedores tecnológicos y otros actores de la cadena agroalimentaria respecto a la titularidad y aprovechamiento de la información. Como señalan Bacco et al. (2019), la consolidación de ecosistemas digitales sostenibles requiere modelos de gobernanza que garanticen la protección de los datos y promuevan relaciones de confianza entre todos los participantes.

Otro aspecto crítico está relacionado con la brecha digital territorial. Las diferencias existentes entre regiones urbanas y rurales en materia de conectividad, infraestructura tecnológica y acceso a servicios digitales continúan limitando la adopción homogénea de innovaciones dentro del sector agroalimentario. Esta situación afecta especialmente a pequeños productores ubicados en zonas alejadas, quienes enfrentan mayores dificultades para acceder a tecnologías, programas de capacitación y asistencia técnica especializada. La reducción de estas desigualdades constituye un requisito indispensable para garantizar que la transformación digital contribuya efectivamente al desarrollo rural y no profundice las diferencias existentes entre territorios. Jha et al. (2019) destacan que el fortalecimiento de la infraestructura y de las capacidades locales representa uno de los pilares fundamentales para impulsar procesos inclusivos de innovación agrícola.

La rápida evolución tecnológica representa igualmente un desafío permanente para las organizaciones. Las tecnologías asociadas con la Industria 4.0 experimentan procesos continuos de actualización, lo que exige a las empresas mantener inversiones sostenidas en infraestructura, capacitación y adaptación organizacional. La transformación digital, por tanto, no puede concebirse como un proyecto con un inicio y un final claramente definidos, sino como un proceso dinámico de mejora continua que requiere aprendizaje organizacional permanente. Frank et al. (2019) sostienen que la competitividad en los entornos digitales depende de la capacidad de las organizaciones para adaptarse continuamente a nuevas tecnologías, modelos de negocio y formas de gestión.

Asimismo, resulta necesario considerar los aspectos éticos asociados con la creciente automatización de los procesos agrícolas. La utilización de inteligencia artificial para apoyar la toma de decisiones plantea interrogantes relacionados con la transparencia de los algoritmos, la responsabilidad frente a decisiones automatizadas y el equilibrio entre el conocimiento tecnológico y la experiencia de los productores. Si bien estas herramientas ofrecen importantes ventajas para optimizar la producción, su implementación debe garantizar que las decisiones continúen siendo supervisadas por profesionales capaces de interpretar críticamente la información generada por los sistemas inteligentes. La European Commission (2020) enfatiza que el desarrollo de tecnologías digitales debe fundamentarse en principios de ética, transparencia y responsabilidad para asegurar una innovación centrada en las personas.

Frente a este panorama, diversos estudios coinciden en que la superación de estas barreras requiere un enfoque sistémico donde empresas, universidades, centros de investigación, organismos gubernamentales y proveedores tecnológicos actúen de manera coordinada. La construcción de ecosistemas de innovación favorece la transferencia de conocimiento, la capacitación del talento humano y el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades reales del sector agroalimentario. FAO (2022) destaca que la colaboración entre actores públicos y privados constituye uno de los mecanismos más efectivos para acelerar la digitalización agrícola y fortalecer la competitividad de las pequeñas y medianas empresas.

En consecuencia, los desafíos asociados con la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente no deben interpretarse únicamente como obstáculos para la innovación, sino también como oportunidades para replantear los modelos tradicionales de gestión y construir sistemas agroalimentarios más resilientes, sostenibles e inclusivos. La superación de estas barreras dependerá de la capacidad para integrar tecnología, conocimiento, políticas públicas y cooperación institucional dentro de una estrategia común de transformación digital. Sobre esta base emerge un nuevo escenario

de evolución tecnológica, representado por la Agricultura 5.0, donde la inteligencia artificial, la automatización avanzada y la sostenibilidad convergen para configurar una nueva generación de sistemas productivos.

Tabla 2.

Principales barreras para la adopción de la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente en las PYMES agroalimentarias

<i>Barrera</i>	<i>Implicaciones para las PYMES agroalimentarias</i>	<i>Principales referencias</i>
Limitada capacidad de inversión	Dificulta la adquisición, implementación y actualización de infraestructura tecnológica, plataformas digitales y sistemas inteligentes de producción.	Frank et al. (2019); Klerkx et al. (2019)
Brecha en infraestructura digital	Restricciones en conectividad, acceso a Internet, servicios en la nube y tecnologías inteligentes, especialmente en zonas rurales.	Ayaz et al. (2019); Bacco et al. (2019); European Commission (2020)
Escasez de competencias digitales	Limitada capacidad para utilizar herramientas digitales, interpretar datos y gestionar procesos de transformación tecnológica.	Klerkx et al. (2019); European Commission (2020); IFPRI (2023)
Resistencia al cambio organizacional	Lentitud en la adopción de innovaciones debido a barreras culturales, organizacionales y de liderazgo.	Shafi et al. (2019); Frank et al. (2019)
Interoperabilidad limitada	Dificultades para integrar tecnologías, plataformas y equipos desarrollados por distintos proveedores.	Fountas et al. (2020); Bacco et al. (2019)
Gobernanza y protección de datos	Riesgos relacionados con la propiedad, privacidad, acceso, intercambio y uso ético de la información agrícola.	Bacco et al. (2019); European Commission (2020)
Ciberseguridad	Mayor exposición a accesos no autorizados, pérdida de información y vulnerabilidades en sistemas digitales interconectados.	Bacco et al. (2019); European Commission (2020)
Políticas públicas y financiamiento insuficientes	Limitado acceso a incentivos, créditos, programas de innovación y mecanismos de apoyo para la transformación digital.	IFPRI (2023); FAO (2022); European Commission (2020)
Brechas tecnológicas entre empresas y territorios	Incremento de las diferencias competitivas entre grandes empresas y PYMES, así como entre regiones con distinto nivel de desarrollo digital.	Frank et al. (2019); IFPRI (2023); Jha et al. (2019)

Fuente. Elaboración propia a partir de Frank et al. (2019), Fountas et al. (2020), Ayaz et al. (2019), Klerkx et al. (2019), Bacco et al. (2019), Shafi et al. (2019), FAO (2022), IFPRI (2023), European Commission (2020) y Klerkx et al. (2019).

3.6. Hacia la Agricultura 5.0: perspectivas futuras para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias

La convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente está impulsando una nueva etapa de transformación tecnológica conocida como Agricultura 5.0, paradigma que amplía el alcance de la digitalización agrícola al integrar inteligencia artificial avanzada, automatización inteligente, sostenibilidad y colaboración entre personas y sistemas tecnológicos (European Commission, 2020). A diferencia de la Agricultura 4.0, cuyo propósito principal fue incrementar la productividad mediante la incorporación de sensores, plataformas de Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos, la Agricultura 5.0 plantea un enfoque centrado en la resiliencia, la sostenibilidad ambiental y la generación de valor social. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), esta evolución responde a la necesidad de construir sistemas agroalimentarios capaces de producir más con menos recursos, reducir el impacto ambiental y garantizar la seguridad alimentaria frente a los desafíos derivados del cambio climático. En este

escenario, las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias constituyen actores fundamentales debido a su contribución al abastecimiento de alimentos, la generación de empleo y el desarrollo económico de las zonas rurales (OECD, 2019).

Uno de los principales impulsores de esta nueva etapa será la evolución de la inteligencia artificial hacia modelos capaces de asistir de forma más integral en la toma de decisiones agrícolas. Mientras que las primeras aplicaciones de inteligencia artificial estuvieron orientadas principalmente al reconocimiento de patrones o a la predicción de variables específicas, las nuevas generaciones de algoritmos permiten integrar información procedente de sensores ambientales, imágenes satelitales, drones, estaciones meteorológicas y registros históricos para generar recomendaciones adaptadas a las condiciones particulares de cada explotación agrícola (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Estas capacidades favorecerán una agricultura más precisa y eficiente, permitiendo optimizar el uso de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios sin comprometer la productividad. Al mismo tiempo, la automatización inteligente contribuirá a reducir errores operativos y facilitará la planificación de actividades agrícolas sustentadas en información objetiva y actualizada (Liakos et al., 2018).

La creciente disponibilidad de grandes volúmenes de datos agrícolas también favorecerá el desarrollo de modelos predictivos cada vez más sofisticados. La integración del análisis de datos con técnicas de aprendizaje automático permitirá anticipar riesgos relacionados con enfermedades de los cultivos, aparición de plagas, disponibilidad hídrica y variabilidad climática antes de que estos afecten significativamente la producción. Klerkx et al. (2019) sostienen que el verdadero valor del Big Data en la agricultura no radica únicamente en la recopilación masiva de información, sino en la capacidad para transformarla en conocimiento útil que respalde decisiones oportunas y reduzca la incertidumbre de los procesos productivos. Esta capacidad predictiva adquiere especial relevancia para las pequeñas y medianas empresas, cuyos márgenes de rentabilidad suelen ser más sensibles frente a eventos climáticos extremos o fluctuaciones del mercado.

Otra tendencia que caracteriza la transición hacia la Agricultura 5.0 corresponde al fortalecimiento de los ecosistemas digitales de innovación. La transformación tecnológica del sector agroalimentario requiere una interacción permanente entre productores, universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas y organismos públicos, favoreciendo procesos de innovación abierta donde el conocimiento pueda compartirse de manera colaborativa (OECD, 2019). Diversos estudios indican que estos ecosistemas permiten acelerar la transferencia tecnológica, reducir los costos de adopción de nuevas herramientas digitales y facilitar el acceso de las pequeñas empresas a soluciones tecnológicas que anteriormente estaban restringidas a grandes organizaciones con mayor capacidad financiera (European Commission, 2020). En consecuencia, la cooperación institucional se convierte en un elemento estratégico para reducir las brechas tecnológicas que aún persisten entre diferentes regiones y tipos de productores.

Paralelamente, la sostenibilidad ambiental se consolidará como uno de los principios rectores de la Agricultura 5.0. La aplicación conjunta de sensores inteligentes, plataformas IoT, inteligencia artificial y sistemas de monitoreo remoto permitirá gestionar con mayor precisión variables relacionadas con el consumo de agua, la fertilización, la calidad del suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2024). Estas herramientas facilitarán la implementación de estrategias de agricultura regenerativa orientadas a conservar la biodiversidad, mejorar la salud del suelo y aumentar la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos naturales. De esta manera, la digitalización dejará de perseguir exclusivamente objetivos de productividad para convertirse en un instrumento que contribuya simultáneamente al desarrollo económico, la protección ambiental y el bienestar de las comunidades rurales, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible promovidos por las Naciones Unidas.

La consolidación de la Agricultura 5.0 también estará estrechamente vinculada con la incorporación de gemelos digitales (Digital Twins), tecnología que permite construir representaciones virtuales de cultivos, sistemas de riego, invernaderos e incluso cadenas completas de suministro agroalimentario. Estas réplicas digitales integran información procedente de sensores, dispositivos IoT, imágenes satelitales y modelos predictivos para simular el comportamiento de los sistemas productivos antes de ejecutar decisiones en condiciones reales (Verdouw et al., 2021). Gracias a esta capacidad, los productores podrán evaluar diferentes escenarios relacionados con la disponibilidad hídrica, la

aplicación de fertilizantes, el desarrollo fenológico de los cultivos o la aparición de enfermedades, reduciendo riesgos técnicos y económicos. Para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, esta tecnología representa una herramienta de planificación estratégica que favorece decisiones fundamentadas en evidencia y disminuye los costos asociados con pruebas experimentales realizadas directamente en campo (European Commission, 2020).

Otra innovación con elevado potencial corresponde a la computación en el borde (Edge Computing), arquitectura tecnológica que permite procesar información directamente en los dispositivos ubicados en el entorno agrícola, evitando depender exclusivamente de plataformas de computación en la nube. Esta característica resulta especialmente importante en regiones rurales donde la conectividad continúa siendo limitada o inestable. El procesamiento local de la información disminuye la latencia en la transmisión de datos, mejora la capacidad de respuesta de los sistemas inteligentes y garantiza la continuidad del monitoreo aun cuando existan interrupciones en el acceso a Internet (Verdouw et al., 2021). La integración del Edge Computing con redes IoT favorecerá sistemas agrícolas más autónomos, capaces de ejecutar acciones inmediatas sobre sistemas de riego, climatización o fertirrigación sin requerir intervención humana permanente, incrementando la eficiencia operativa de las explotaciones agrícolas.

De igual manera, la trazabilidad digital adquirirá una importancia creciente mediante la incorporación de tecnologías como blockchain, cuya principal contribución consiste en garantizar registros inalterables de cada etapa del proceso productivo. Esta tecnología permitirá documentar de manera segura el origen de los productos, las prácticas agrícolas implementadas, los tratamientos fitosanitarios, las condiciones de almacenamiento y los procesos logísticos hasta llegar al consumidor final (Casino et al., 2019). La transparencia generada por blockchain fortalecerá la confianza de consumidores y distribuidores, facilitará la certificación de prácticas sostenibles y contribuirá al cumplimiento de estándares internacionales relacionados con inocuidad alimentaria y responsabilidad ambiental. Para las PYMES agroalimentarias, esta herramienta constituye una oportunidad para incrementar el valor agregado de sus productos y acceder a mercados donde la trazabilidad representa un requisito indispensable para la comercialización.

Paralelamente, la evolución de la robótica agrícola dará lugar a sistemas cada vez más colaborativos, diseñados para complementar el trabajo humano en lugar de sustituirlo completamente. Los robots colaborativos podrán asumir actividades repetitivas o físicamente exigentes, como la cosecha selectiva, el monitoreo permanente de cultivos, la identificación automática de malezas o la aplicación localizada de insumos agrícolas, mientras los operadores concentrarán sus esfuerzos en funciones relacionadas con la supervisión, la planificación y la toma de decisiones estratégicas (Shamshiri et al., 2018). Este enfoque favorece un modelo de producción donde la tecnología amplía las capacidades humanas, incrementando simultáneamente la productividad, la seguridad laboral y la eficiencia operacional, aspectos especialmente relevantes para explotaciones agrícolas con limitada disponibilidad de mano de obra.

No obstante, la transición hacia la Agricultura 5.0 también plantea importantes desafíos para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias. Diversas investigaciones coinciden en que la incorporación de tecnologías avanzadas requiere inversiones significativas en infraestructura digital, conectividad, capacitación del talento humano y actualización permanente de los procesos organizacionales (OECD, 2019). A ello se suman retos relacionados con la interoperabilidad entre plataformas tecnológicas, la protección de los datos agrícolas, la ciberseguridad y la necesidad de establecer marcos regulatorios que promuevan un uso ético y responsable de la inteligencia artificial. La FAO (2024) advierte que, si estos desafíos no son abordados mediante políticas públicas inclusivas y mecanismos adecuados de financiamiento, la transformación digital podría profundizar las desigualdades existentes entre empresas con diferentes niveles de desarrollo tecnológico.

En este contexto, el fortalecimiento de las competencias digitales emerge como uno de los factores más determinantes para garantizar una adopción efectiva de las tecnologías asociadas con la Agricultura 5.0. La digitalización del sector agroalimentario exige que productores, técnicos y gestores desarrollen capacidades relacionadas con el análisis de datos, la interpretación de información proveniente de sensores, el manejo de plataformas digitales y la utilización de herramientas de inteligencia artificial para la toma de decisiones (European Commission, 2020). En consecuencia, las

estrategias de formación continua y transferencia tecnológica deberán ocupar un lugar prioritario dentro de las políticas de desarrollo rural, favoreciendo procesos de innovación inclusivos que permitan reducir las brechas existentes entre grandes empresas y pequeñas unidades productivas.

Finalmente, las perspectivas futuras evidencian que la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente continuará transformando profundamente la organización de los sistemas agroalimentarios. La integración progresiva de inteligencia artificial, Internet de las Cosas, análisis avanzado de datos, robótica, blockchain, gemelos digitales y plataformas colaborativas permitirá desarrollar modelos de producción más resilientes, eficientes y sostenibles, capaces de responder con mayor rapidez a los desafíos ambientales, económicos y sociales que enfrenta la agricultura contemporánea (Klerkx et al., 2019; Liakos et al., 2018). Para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, la Agricultura 5.0 representa una oportunidad estratégica para fortalecer su competitividad, optimizar el uso de los recursos y consolidar modelos de negocio basados en la innovación permanente. Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de estas oportunidades dependerá de la articulación entre inversión tecnológica, fortalecimiento del capital humano, cooperación institucional y políticas públicas orientadas a garantizar una transformación digital inclusiva y sostenible, capaz de beneficiar a todos los actores que conforman las cadenas agroalimentarias.

En los próximos años, otro aspecto que adquirirá una importancia estratégica será el desarrollo de sistemas de interoperabilidad digital, capaces de integrar información procedente de diferentes plataformas, fabricantes y tecnologías dentro de un mismo ecosistema de gestión agrícola. Actualmente, uno de los principales obstáculos para la transformación digital del sector radica en la utilización de soluciones tecnológicas aisladas que dificultan el intercambio de información entre sensores, maquinaria agrícola, sistemas de información geográfica y plataformas de análisis de datos (Klerkx et al., 2019). La Agricultura 5.0 plantea la necesidad de construir infraestructuras digitales abiertas y estandarizadas que faciliten la comunicación entre dispositivos, optimicen el flujo de información y permitan una gestión integral de los procesos productivos. Para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, la interoperabilidad reducirá costos de implementación, evitará la dependencia de proveedores específicos y favorecerá una adopción tecnológica más flexible y escalable (European Commission, 2020).

Asimismo, la creciente preocupación por la sostenibilidad impulsará la incorporación de indicadores ambientales, sociales y económicos dentro de los sistemas inteligentes de gestión agrícola. La evaluación permanente de variables relacionadas con la huella hídrica, la huella de carbono, la eficiencia energética, la biodiversidad y la conservación del suelo permitirá que las decisiones productivas respondan no solo a criterios de rentabilidad económica, sino también a objetivos de responsabilidad ambiental y desarrollo sostenible (FAO, 2024). En consecuencia, las tecnologías digitales evolucionarán desde herramientas orientadas exclusivamente al incremento de la productividad hacia instrumentos de apoyo para la construcción de sistemas agroalimentarios más resilientes, transparentes y alineados con las exigencias de consumidores y mercados internacionales.

Otro aspecto relevante será la consolidación de modelos de agricultura basada en datos (data-driven agriculture), donde la información generada durante todas las etapas del proceso productivo constituirá un activo estratégico para las organizaciones. La capacidad para recopilar, almacenar, analizar e interpretar datos provenientes de múltiples fuentes permitirá desarrollar modelos predictivos cada vez más precisos, fortalecer los procesos de planificación y optimizar continuamente la utilización de recursos naturales y financieros (Liakos et al., 2018). Sin embargo, este nuevo escenario también demandará mecanismos robustos para garantizar la calidad de los datos, la privacidad de la información y la ciberseguridad de las plataformas digitales, aspectos que diversos organismos internacionales consideran fundamentales para asegurar una transformación tecnológica confiable y sostenible (OECD, 2019).

En conjunto, la evidencia científica indica que la Agricultura 5.0 representa mucho más que una evolución tecnológica; constituye un cambio estructural en la manera de comprender, gestionar y desarrollar los sistemas agroalimentarios. La convergencia entre inteligencia artificial, Internet de las Cosas, Big Data, robótica, computación en el borde, blockchain y analítica avanzada permitirá construir modelos productivos caracterizados por una mayor capacidad de adaptación, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Klerkx et al., 2019). No obstante, el éxito de este proceso dependerá de la capacidad de los diferentes actores para fortalecer la innovación,

impulsar la cooperación interinstitucional y garantizar que las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias tengan acceso equitativo a las tecnologías emergentes, evitando que la transformación digital amplíe las brechas existentes entre regiones y tipos de productores.

Finalmente, la transición hacia la Agricultura 5.0 exige comprender que la innovación tecnológica debe concebirse como un proceso integral donde convergen infraestructura digital, capital humano, políticas públicas, investigación científica y sostenibilidad. Las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias que logren integrar estos componentes estarán en mejores condiciones para responder a escenarios caracterizados por una elevada incertidumbre climática, económica y social. En este sentido, la Agricultura 5.0 no representa únicamente el futuro de la producción agrícola, sino una estrategia para fortalecer la resiliencia de los sistemas agroalimentarios, mejorar la competitividad empresarial y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible mediante una transformación digital inclusiva, ética y ambientalmente responsable (European Commission, 2020; FAO, 2024).

Tabla 3.

Principales tendencias de la Agricultura 5.0 y su impacto potencial en las PYMES agroalimentarias

Tendencia emergente	Aplicación esperada	Impacto potencial en las PYMES
Inteligencia artificial generativa	Asistentes inteligentes, planificación y recomendaciones automáticas	Mejora de la toma de decisiones y democratización del conocimiento técnico
Gemelos digitales (Digital Twins)	Simulación de escenarios agrícolas y planificación predictiva	Reducción de riesgos y optimización de la producción
Computación en el borde (Edge Computing)	Procesamiento local de datos agrícolas	Mayor autonomía operativa en zonas con conectividad limitada
Blockchain	Trazabilidad y certificación digital de productos	Mayor confianza del consumidor y acceso a mercados internacionales
Robótica colaborativa	Automatización asistida de labores agrícolas	Incremento de la productividad y reducción de tareas repetitivas
Agricultura regenerativa digital	Monitoreo ambiental y gestión sostenible	Conservación de recursos naturales y fortalecimiento de la sostenibilidad
Ecosistemas de innovación abierta	Cooperación entre empresas, universidades y centros tecnológicos	Aceleración de la transferencia tecnológica y fortalecimiento de la innovación

Fuente. Elaboración propia a partir de Klerkx et al. (2019), Liakos et al. (2018), Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018), Verdouw et al. (2021), European Commission (2020), FAO (2024) y OECD (2019).

4. DISCUSIÓN

La presente revisión evidencia que la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente constituye uno de los procesos de transformación tecnológica más significativos que experimenta actualmente el sector agroalimentario. A diferencia de los enfoques tradicionales, centrados en la incorporación aislada de herramientas digitales, la literatura reciente demuestra que la verdadera innovación radica en la integración de sensores inteligentes, Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial, Big Data, computación en la nube y sistemas ciberfísicos dentro de ecosistemas digitales capaces de recopilar, analizar e interpretar información en tiempo real para apoyar la toma de decisiones (Klerkx et al., 2019). Esta visión sistémica coincide con la planteada por la European Commission (2020), la cual sostiene que la transformación digital solo genera ventajas competitivas sostenibles cuando las tecnologías se articulan con procesos organizacionales, competencias digitales y estrategias de innovación orientadas a la creación de valor. En consecuencia, la digitalización agrícola deja de concebirse como un proceso exclusivamente tecnológico para convertirse en un modelo integral de gestión del conocimiento.

Uno de los principales hallazgos identificados durante esta revisión corresponde a la estrecha relación existente entre los principios de la Industria 4.0 y la evolución de la Agricultura Inteligente. Diversos estudios coinciden en señalar que

tecnologías inicialmente desarrolladas para la manufactura inteligente han sido adaptadas progresivamente al contexto agrícola, permitiendo automatizar procesos, mejorar la conectividad entre dispositivos y fortalecer la capacidad de análisis de grandes volúmenes de información (Liakos et al., 2018). Mientras Klerkx et al. (2019) destacan que el verdadero potencial de estas tecnologías reside en la integración de datos provenientes de múltiples fuentes, Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018) enfatizan que la inteligencia artificial amplía significativamente la precisión de los modelos predictivos utilizados para optimizar la producción agrícola. Esta complementariedad evidencia que la Agricultura Inteligente representa una evolución conceptual derivada de la aplicación de los principios de la Industria 4.0 al sector agroalimentario, donde la información se convierte en el principal recurso estratégico para incrementar la eficiencia de los sistemas productivos.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la transformación del concepto de competitividad dentro de las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias. Tradicionalmente, la capacidad competitiva dependía principalmente de factores como la disponibilidad de recursos físicos, la infraestructura productiva o el acceso a insumos agrícolas. Sin embargo, las investigaciones recientes muestran que la competitividad está cada vez más condicionada por la capacidad para gestionar información, incorporar innovación tecnológica y desarrollar procesos organizacionales flexibles que faciliten la adaptación a escenarios dinámicos (OECD, 2019). Desde esta perspectiva, la competitividad deja de sustentarse únicamente en la productividad para incorporar elementos relacionados con la capacidad analítica, la gestión del conocimiento, la innovación continua y la transformación digital. Esta evolución resulta particularmente relevante para las PYMES, ya que la adopción estratégica de tecnologías digitales puede compensar limitaciones tradicionales asociadas con el tamaño empresarial, permitiendo mejorar su posicionamiento dentro de mercados cada vez más competitivos y globalizados.

La evidencia revisada también demuestra que la convergencia tecnológica favorece una utilización considerablemente más eficiente de los recursos naturales empleados durante la producción agrícola. La incorporación de sensores inteligentes, plataformas IoT, imágenes satelitales, inteligencia artificial y sistemas de monitoreo continuo permite evaluar variables relacionadas con humedad del suelo, temperatura, nutrición vegetal, crecimiento de los cultivos y aparición de enfermedades, facilitando intervenciones oportunas que optimizan el uso del agua, fertilizantes, energía y productos fitosanitarios (Liakos et al., 2018). Estos resultados coinciden con los planteamientos de la FAO (2024), organismo que identifica la agricultura digital como uno de los principales instrumentos para incrementar simultáneamente la productividad y la sostenibilidad ambiental. En consecuencia, la transformación digital no solo genera beneficios económicos mediante la reducción de costos operativos, sino que también contribuye al cumplimiento de objetivos relacionados con la conservación de los recursos naturales, la mitigación del cambio climático y la producción sostenible de alimentos.

Desde una perspectiva organizacional, los estudios analizados evidencian que la digitalización agrícola implica transformaciones estructurales que trascienden la incorporación de nuevas tecnologías. La implementación de plataformas digitales modifica la planificación de los procesos productivos, fortalece la coordinación entre diferentes áreas de la empresa y mejora significativamente la calidad de la información utilizada durante la toma de decisiones estratégicas. Asimismo, la integración digital favorece mayores niveles de trazabilidad, transparencia y coordinación entre productores, proveedores, distribuidores y consumidores, fortaleciendo las cadenas agroalimentarias mediante flujos permanentes de información (European Commission, 2020). Estos hallazgos amplían el enfoque tradicional de la Agricultura Inteligente, mostrando que sus efectos no se limitan al incremento de la productividad agrícola, sino que también transforman la estructura organizacional, la gestión empresarial y las relaciones de colaboración establecidas entre los distintos actores del sistema agroalimentario.

No obstante, la literatura coincide en señalar que los beneficios asociados con la transformación digital no se distribuyen de manera homogénea entre todas las organizaciones. Las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias continúan enfrentando importantes limitaciones relacionadas con los elevados costos de inversión, la insuficiente infraestructura tecnológica, las deficiencias en conectividad rural y la limitada disponibilidad de talento humano especializado para implementar tecnologías avanzadas (OECD, 2019). Estas barreras reducen la velocidad de

adopción tecnológica y generan diferencias importantes respecto a las grandes organizaciones, las cuales disponen de mayores recursos financieros y capacidades técnicas para incorporar procesos de innovación. De igual manera, la FAO (2024) advierte que, si estas desigualdades no son abordadas mediante políticas públicas orientadas al fortalecimiento de la infraestructura digital, el acceso al financiamiento y la capacitación permanente, la transformación tecnológica podría incrementar las brechas de competitividad existentes dentro del sector agroalimentario, limitando especialmente el desarrollo de las PYMES.

La revisión también permitió identificar que uno de los desafíos más relevantes asociados con la digitalización agrícola corresponde a la gobernanza de los datos. El crecimiento exponencial de la información generada por sensores, plataformas IoT, drones, imágenes satelitales y sistemas de inteligencia artificial plantea interrogantes relacionados con la propiedad, privacidad, interoperabilidad y seguridad de los datos agrícolas. En este contexto, la European Commission (2020) sostiene que el desarrollo de ecosistemas digitales sostenibles requiere establecer marcos regulatorios que garanticen el uso transparente, ético y seguro de la información, favoreciendo simultáneamente la innovación y la protección de los derechos de productores y consumidores. De manera similar, la OECD (2019) destaca que la confianza en las tecnologías digitales dependerá de la existencia de políticas claras sobre intercambio de datos, ciberseguridad y estándares de interoperabilidad que faciliten la integración entre diferentes plataformas tecnológicas. Para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, este aspecto adquiere una importancia particular, ya que la limitada disponibilidad de recursos técnicos puede dificultar la implementación de mecanismos adecuados de protección de la información, incrementando la vulnerabilidad frente a riesgos asociados con la transformación digital.

Otro hallazgo significativo de esta revisión corresponde a la evolución conceptual hacia la denominada Agricultura 5.0, paradigma que amplía el enfoque de la Agricultura Inteligente al integrar objetivos de sostenibilidad ambiental, bienestar social y resiliencia dentro de los procesos de innovación tecnológica. Mientras la Agricultura Inteligente priorizó inicialmente el incremento de la eficiencia productiva mediante el uso de tecnologías digitales, la Agricultura 5.0 incorpora una visión más amplia orientada a desarrollar sistemas agroalimentarios capaces de responder simultáneamente a los desafíos económicos, ambientales y sociales que enfrenta la producción de alimentos (European Commission, 2020). En este escenario adquieren especial relevancia tecnologías emergentes como la inteligencia artificial generativa, los gemelos digitales, la computación en el borde, blockchain y la robótica colaborativa, las cuales permiten optimizar la planificación, fortalecer la trazabilidad, mejorar la capacidad predictiva y favorecer procesos productivos más sostenibles (Verdouw et al., 2021). En consecuencia, la innovación tecnológica deja de orientarse exclusivamente hacia el incremento del rendimiento para convertirse en un instrumento que facilita la construcción de sistemas agrícolas más resilientes, inclusivos y ambientalmente responsables.

La literatura analizada también evidencia que la consolidación de este nuevo paradigma dependerá en gran medida del fortalecimiento del capital humano y de las competencias digitales de los diferentes actores del sector agroalimentario. Diversos autores coinciden en que la incorporación de tecnologías avanzadas requiere capacidades relacionadas con el análisis e interpretación de datos, el manejo de plataformas digitales, la utilización de herramientas de inteligencia artificial y la comprensión de modelos predictivos aplicados a la gestión agrícola (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; European Commission, 2020). En este sentido, la transformación digital no debe entenderse únicamente como un proceso de adquisición de infraestructura tecnológica, sino como una estrategia integral que involucra formación continua, aprendizaje organizacional y fortalecimiento de capacidades institucionales. La evidencia revisada sugiere que las organizaciones que logran combinar inversión tecnológica con desarrollo del talento humano presentan mayores probabilidades de consolidar procesos de innovación sostenibles y de obtener beneficios duraderos derivados de la digitalización.

A pesar del crecimiento sostenido de la producción científica sobre Industria 4.0 y Agricultura Inteligente, esta revisión permitió identificar importantes vacíos de conocimiento que continúan limitando la comprensión integral del fenómeno. La mayoría de las investigaciones disponibles se concentra en el análisis de tecnologías específicas o en estudios de caso desarrollados en grandes empresas agrícolas, mientras que las evidencias relacionadas con pequeñas

y medianas empresas agroalimentarias permanecen relativamente escasas. Asimismo, predominan investigaciones de carácter transversal, lo que dificulta evaluar los efectos económicos, sociales y ambientales de la transformación digital a mediano y largo plazo. De igual manera, existe una limitada producción científica orientada a comparar procesos de adopción tecnológica entre diferentes regiones geográficas, sistemas productivos o contextos institucionales, restringiendo la posibilidad de formular modelos generalizables que orienten políticas públicas y estrategias empresariales (OECD, 2019). Estas limitaciones evidencian la necesidad de fortalecer investigaciones que permitan comprender con mayor profundidad los factores que condicionan el éxito de la digitalización en distintos escenarios productivos.

En este contexto, futuras investigaciones deberían orientarse hacia el desarrollo de modelos integrales que permitan evaluar la madurez digital de las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, considerando simultáneamente dimensiones tecnológicas, organizacionales, económicas y sociales. Resulta igualmente pertinente ampliar los estudios relacionados con inteligencia artificial responsable, gobernanza de datos, interoperabilidad de plataformas digitales, economía circular, agricultura regenerativa y resiliencia frente al cambio climático, áreas que han adquirido una importancia creciente dentro de las agendas internacionales de investigación (FAO, 2024; European Commission, 2020). Asimismo, sería conveniente desarrollar investigaciones longitudinales que permitan evaluar el impacto real de la transformación digital sobre la productividad, la sostenibilidad y la competitividad empresarial, proporcionando evidencia sólida para el diseño de políticas públicas orientadas a favorecer una adopción tecnológica más inclusiva y equitativa.

En conjunto, la evidencia científica analizada permite afirmar que la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente constituye un proceso de transformación estructural que redefine la forma en que se producen, gestionan y comercializan los alimentos. La integración de Internet de las Cosas, inteligencia artificial, Big Data, robótica, blockchain, gemelos digitales y otras tecnologías emergentes ha demostrado un elevado potencial para incrementar la eficiencia productiva, optimizar el uso de los recursos naturales y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios (Klerkx et al., 2019; Liakos et al., 2018). Sin embargo, el aprovechamiento pleno de estas oportunidades dependerá de la capacidad para reducir las brechas tecnológicas existentes, fortalecer las competencias digitales, consolidar ecosistemas colaborativos de innovación y promover políticas públicas que faciliten el acceso equitativo a las tecnologías emergentes. Solo mediante una transformación digital inclusiva, basada en el conocimiento, la cooperación y la sostenibilidad, será posible garantizar que las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias participen activamente en la construcción de una agricultura más inteligente, resiliente y competitiva, alineada con los desafíos del desarrollo sostenible y con las demandas futuras de la seguridad alimentaria mundial.

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión narrativa tuvo como propósito analizar la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente como uno de los procesos de transformación tecnológica más relevantes para las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias. La evidencia científica analizada permitió constatar que la integración de tecnologías como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas, el Big Data, el aprendizaje automático, la computación en la nube, los sistemas ciberfísicos y las plataformas digitales está redefiniendo la gestión de los sistemas productivos mediante procesos de monitoreo, automatización y análisis de información en tiempo real. En consecuencia, la convergencia entre ambos paradigmas trasciende la incorporación aislada de herramientas tecnológicas para consolidar ecosistemas digitales capaces de fortalecer la eficiencia, la sostenibilidad y la competitividad del sector agroalimentario.

Los estudios revisados coinciden en señalar que las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias representan uno de los principales escenarios donde la transformación digital puede generar mayores beneficios. La adopción de tecnologías propias de la Industria 4.0 favorece la optimización del uso de recursos naturales, el fortalecimiento de la trazabilidad, la automatización de procesos, la mejora en la toma de decisiones basada en datos y el desarrollo de modelos organizacionales más innovadores y resilientes. Asimismo, la digitalización contribuye a incorporar criterios de sostenibilidad ambiental, resiliencia climática y eficiencia productiva, elementos indispensables para responder a

los desafíos asociados con el crecimiento de la demanda mundial de alimentos y con la necesidad de producir bajo estándares cada vez más exigentes de calidad, seguridad e impacto ambiental.

No obstante, la revisión también evidencia que la consolidación de esta convergencia continúa enfrentando importantes desafíos. Las limitaciones relacionadas con el acceso a financiamiento, la insuficiente infraestructura digital, la brecha de conectividad en zonas rurales, la escasez de competencias digitales, la interoperabilidad entre plataformas tecnológicas, la gobernanza de los datos y la ciberseguridad condicionan el ritmo de adopción de las tecnologías emergentes, especialmente en las pequeñas y medianas empresas. Estos resultados ponen de manifiesto que la transformación digital requiere una visión integral que combine inversión tecnológica, fortalecimiento del talento humano, cooperación entre instituciones y políticas públicas orientadas a reducir las desigualdades existentes en el acceso a la innovación.

Desde la perspectiva científica, la revisión permitió identificar que, aunque la producción académica relacionada con Industria 4.0 y Agricultura Inteligente ha experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos años, persisten importantes vacíos de conocimiento. La mayoría de las investigaciones continúa concentrándose en el análisis de tecnologías específicas o en experiencias desarrolladas en grandes organizaciones, mientras que los estudios dirigidos a comprender la realidad de las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias siguen siendo limitados. Del mismo modo, resulta necesaria la realización de investigaciones longitudinales y comparativas que permitan evaluar el impacto económico, social y ambiental de la transformación digital en diferentes sistemas productivos y contextos geográficos.

En consecuencia, futuras investigaciones deberían orientarse hacia el desarrollo de modelos integrales que permitan evaluar la madurez digital de las pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, identificar los factores que favorecen la adopción tecnológica y analizar la efectividad de las políticas públicas destinadas a impulsar la innovación del sector. Asimismo, resulta prioritario fortalecer las investigaciones relacionadas con inteligencia artificial responsable, gobernanza de datos agrícolas, interoperabilidad tecnológica, agricultura regenerativa digital, economía circular, resiliencia climática y ecosistemas de innovación abierta, considerando tanto los avances tecnológicos como sus implicaciones económicas, sociales y ambientales.

Finalmente, la evolución hacia la Agricultura 5.0 permite anticipar un escenario en el que tecnologías emergentes como la inteligencia artificial generativa, los gemelos digitales, la computación en el borde, blockchain y la robótica colaborativa impulsarán una nueva generación de sistemas agroalimentarios caracterizados por una mayor capacidad de adaptación, eficiencia y sostenibilidad. En este contexto, las pequeñas y medianas empresas que logren integrar estas innovaciones mediante estrategias de transformación digital planificadas estarán en mejores condiciones para fortalecer su competitividad, incrementar su resiliencia frente a los cambios ambientales y económicos, y consolidar modelos de producción más sostenibles e inclusivos. En síntesis, la convergencia entre la Industria 4.0 y la Agricultura Inteligente no constituye únicamente una tendencia tecnológica, sino un nuevo paradigma de desarrollo que redefine la gestión de los sistemas agroalimentarios y proporciona una base científica para orientar futuras investigaciones, el diseño de políticas públicas y la formulación de estrategias empresariales dirigidas a construir una agricultura más inteligente, resiliente y sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Bacco, M., Barsocchi, P., Ferro, E., Gotta, A., & Ruggeri, M. (2019). The digitisation of agriculture: A review of the role of wireless sensor networks and IoT. *Sensors*, 19(12), 2690. <https://doi.org/10.3390/s19122690>
- Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*, 21(11), 3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>

- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- European Commission. (2020). A farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system (COM/2020/381 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381>
- 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). The State of Food and Agriculture 2024: Value-driven transformation of agrifood systems. <https://doi.org/10.4060/cd2616en>
- Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., & Tisserye, B. (2020). Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105236. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105236>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- International Food Policy Research Institute. (2023). 2023 Global Food Policy Report: Rethinking food crisis responses. <https://doi.org/10.2499/9780896294417>
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- 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>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Navarro, E., Costa, N., & Pereira, A. (2020). A systematic review of IoT solutions for smart farming. *Sensors*, 20(15), 4231. <https://doi.org/10.3390/s20154231>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). Digital opportunities for better agricultural policies. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 122. <https://doi.org/10.1787/571a0812-en>
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards Agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Shafi, U., Mumtaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S. A., Zaidi, S. A. R., & Iqbal, N. (2019). Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*, 19(17), 3790. <https://doi.org/10.3390/s19173790>
- Shamshiri, R. R., Weltzien, C., Hameed, I. A., Yule, I. J., Grift, T. E., Balasundram, S. K., Pitonakova, L., Ahmad, D., & Chowdhary, G. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1–14. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>

Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>

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:

Nadia Elizabeth Rodríguez Castillo (NERC)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (NERC)

Curación de datos: (NERC)

Análisis formal: (NERC)

Adquisición de fondos: (NERC)

Investigación: (NERC)

Metodología: (NERC)

Administración del proyecto: (NERC)

Recursos: No aplica

Software: (NERC)

Supervisión: (NERC)

Validación: (NERC)

Visualización: (NERC)

Redacción – Borrador original: (NERC)

Redacción – Revisión y edición: (NERC)