SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p3651

Agricultura 5.0: innovación tecnológica, capital humano y sostenibilidad. Revisión exploratoria

Agriculture 5.0 and Sustainable Soil Management: Technological Innovation and Human Capital. An Exploratory Review

Yovany Ospina Nieto[1*] ✉, Oscar Eduardo Trujillo Obando[2] ✉, Jhony Armando Benavides-Bolaños[3] ✉

[1*] Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Palmira, Colombia.
[2] Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Colombia.
[3] Universidad del Valle, Escuela de Ingenieríia de los Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) Cali, Colombia

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 36-51 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 06/08/2026 - ACEP.: 28/08/2026

RESUMEN

El objetivo fue analizar cómo la literatura científica relaciona las tecnologías de la Agricultura 5.0 con el capital humano y las condiciones institucionales, y cómo esta articulación puede contribuir a la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas agrícolas, con atención a sus implicaciones para el manejo del suelo. Se realizó una revisión exploratoria de la literatura, reportada de acuerdo con los elementos aplicables de PRISMA 2020. Se examinaron 29 documentos publicados entre 2019 y 2025; 27 fueron incluidos en la revisión y 14 integraron el corpus analítico principal. La evidencia se examinó mediante una síntesis temática y un mapa exploratorio de relaciones conceptuales visualizado mediante VOSviewer. La literatura relaciona la inteligencia artificial, el Internet de las cosas, la robótica, los drones, los gemelos digitales y el análisis de datos con el monitoreo de los sistemas productivos, el uso eficiente del agua y los nutrientes, la predicción de riesgos y la toma de decisiones. Sin embargo, la adopción y los beneficios dependen de la conectividad, la financiación, las competencias digitales, el soporte técnico, la gobernanza de datos y el acceso equitativo. Se concluye que la Agricultura 5.0 puede contribuir a sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes cuando la innovación tecnológica se articula con el conocimiento agronómico, las capacidades locales, los servicios de extensión y políticas que incluyan a los pequeños productores.

Palabras clave: Salud del suelo; digitalización rural; competencias digitales; gobernanza de datos; colaboración humano-máquina.

ABSTRACT

The objective was to analyze how the scientific literature relates Agriculture 5.0 technologies to human capital and institutional conditions, and how this articulation may contribute to productivity, sustainability, and resilience in agricultural systems, with attention to its implications for soil management. An exploratory literature review was conducted and reported according to the applicable items of PRISMA 2020. Twenty-nine documents published between 2019 and 2025 were examined; 27 were included in the review and 14 comprised the main analytical corpus. The evidence was examined through thematic synthesis and an exploratory conceptual map visualized using VOSviewer. The literature relates artificial intelligence, the Internet of Things, robotics, drones, digital twins, and data analytics to agricultural-system monitoring, efficient use of water and nutrients, risk prediction, and decision-making. However, adoption and benefits depend on connectivity, funding, digital skills, technical support, data governance, and equitable access. Agriculture 5.0 can contribute to more sustainable and resilient agricultural systems when technological innovation is combined with agronomic knowledge, local capacities, extension services, and policies that include smallholder producers.

Keywords: Soil health; rural digitalization; digital skills; data governance; human–machine collaboration.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente fundamental de los sistemas agrícolas, pues interviene en el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, el desarrollo de los cultivos y la regulación de procesos ambientales. Sin embargo, la agricultura enfrenta presiones asociadas con el cambio climático, la degradación del suelo, la escasez de agua, la pérdida de biodiversidad, la volatilidad de los mercados, el aumento de los costos de producción y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria. Estas condiciones demandan modelos productivos capaces de mejorar la eficiencia sin aumentar la presión sobre los ecosistemas.

En este contexto, la digitalización agrícola ha favorecido el desarrollo de sensores, sistemas de monitoreo, teledetección, automatización y análisis predictivo para apoyar la gestión de cultivos, animales, recursos naturales y cadenas de suministro. En particular, estas herramientas pueden contribuir al seguimiento de variables productivas y edáficas, así como al uso más eficiente del agua, los nutrientes y otros insumos agrícolas (Fountas et al. 2024; Sharma et al. 2024).

La Agricultura 4.0 se caracterizó por la incorporación de sensores, sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial, robótica, computación en la nube y análisis de datos. La Agricultura 5.0 conserva estas capacidades, pero las articula con una perspectiva centrada en las personas, la sostenibilidad y la resiliencia. Por tanto, no propone sustituir de manera generalizada al agricultor por máquinas, sino promover una colaboración en la que los sistemas tecnológicos procesen información y ejecuten tareas repetitivas, mientras las personas aportan conocimiento contextual, criterio agronómico, supervisión y responsabilidad ética.

La Industria 5.0 constituye el marco conceptual de este enfoque. La Comisión Europea la define como un paradigma complementario a la Industria 4.0, orientado a superar una visión centrada exclusivamente en la eficiencia económica. Sus pilares son la centralidad humana, la sostenibilidad y la resiliencia (European Commission 2021). Aplicados a la agricultura, estos principios implican adaptar las tecnologías a la variabilidad biológica, climática y territorial de los sistemas productivos. La inteligencia artificial, la robótica, los drones, la automatización y los gemelos digitales pueden apoyar el monitoreo, la predicción de riesgos y la optimización del uso de recursos; sin embargo, sus beneficios dependen de la calidad de los datos, la conectividad, la formación, la financiación y la participación de los actores rurales (Demircioğlu et al. 2024; Fountas et al. 2024).

La adopción de estas tecnologías también plantea desafíos relacionados con la privacidad, la ciberseguridad, la gobernanza de los datos, la dependencia tecnológica y la posible exclusión de pequeños productores. En consecuencia, la innovación tecnológica no garantiza por sí misma una agricultura sostenible. Es necesario fortalecer las competencias digitales, agronómicas, analíticas y organizativas de agricultores, trabajadores, extensionistas y organizaciones rurales. Asimismo, deben promoverse políticas e instituciones que faciliten el acceso equitativo a la tecnología y que protejan la autonomía de las comunidades y la sostenibilidad de los recursos naturales.

Aunque el interés por la Agricultura 5.0 ha aumentado, una parte importante de la literatura se concentra en describir tecnologías y arquitecturas digitales. Es necesario profundizar en la manera en que dichas herramientas se articulan con el capital humano, el conocimiento agronómico y las condiciones institucionales, especialmente

en relación con el manejo sostenible del suelo y la inclusión de pequeños productores en contextos rurales latinoamericanos. Por ello, la pregunta orientadora de esta revisión fue: ¿Cómo se articulan las tecnologías de la Agricultura 5.0, el capital humano y las condiciones institucionales, y qué implicaciones tienen para la sostenibilidad y el manejo del suelo? El objetivo fue analizar cómo la literatura científica describe la relación entre la Agricultura 5.0, la innovación tecnológica, el capital humano y las condiciones institucionales, con énfasis en sus contribuciones potenciales a la productividad, la sostenibilidad, la resiliencia y el manejo sostenible del suelo.

Fundamentación conceptual

Evolución de la industria 4.0 a la industria 5.0. La Industria 4.0 se asocia con la integración de sistemas ciberfísicos, Internet de las cosas, inteligencia artificial, automatización, robótica, computación en la nube y análisis de grandes volúmenes de datos. Su propósito principal ha sido mejorar la conectividad, la eficiencia operativa y la toma de decisiones basada en información.

La Industria 5.0 no sustituye a la Industria 4.0, sino que amplía sus posibilidades mediante una orientación centrada en las personas, la sostenibilidad y la resiliencia (Breque et al. 2021). Por tanto, no constituye únicamente una nueva etapa tecnológica, sino un marco sociotécnico que cuestiona que la eficiencia económica sea el único criterio para valorar la innovación. La tecnología debe contribuir también al bienestar de los trabajadores, las comunidades, las organizaciones y el medioambiente (European Commission 2021).

La centralidad humana implica que las personas mantengan un papel activo en el diseño, la supervisión y el uso de los sistemas tecnológicos. En el sector agrícola, esto supone que la inteligencia artificial, los robots y los algoritmos apoyen la interpretación de información y la ejecución de tareas, sin eliminar el conocimiento agronómico, la experiencia territorial ni la responsabilidad humana. En este artículo, el capital humano se entiende como una condición habilitante para la Agricultura 5.0, y no como un cuarto pilar formal de la Industria 5.0. Incluye conocimientos agronómicos, competencias digitales, capacidad analítica, criterio ético y habilidades para tomar decisiones en contextos productivos cambiantes.

La resiliencia se refiere a la capacidad de los sistemas productivos para anticipar, enfrentar, adaptarse y recuperarse de perturbaciones climáticas, sanitarias, económicas y logísticas. En la Industria 5.0, este concepto no se limita a mantener la continuidad de las operaciones, sino que también comprende la capacidad de aprender, innovar y transformar los sistemas frente a condiciones de incertidumbre (Breque et al. 2021; Szara 2025). En la agricultura, la resiliencia implica mantener las funciones productivas y ambientales del sistema, incluida la capacidad del suelo para sostener los cultivos y regular el agua y los nutrientes.

La sostenibilidad integra las dimensiones ambiental, económica y social de la producción. Desde esta perspectiva, no consiste únicamente en reducir el consumo de energía, las emisiones o los residuos, sino también en conservar los recursos naturales, garantizar la viabilidad económica y promover una distribución equitativa de los beneficios tecnológicos (Rame et al. 2024). En el ámbito agrícola, la sostenibilidad debe relacionarse con el manejo responsable del suelo, el uso eficiente del agua y los nutrientes, la conservación de la biodiversidad y la reducción de los procesos de degradación. Por ello, las tecnologías de la Agricultura 5.0 adquieren valor cuando contribuyen simultáneamente a

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

la productividad, la protección ambiental y el bienestar de las comunidades rurales.

En conjunto, la evolución de la Industria 4.0 a la Industria 5.0 representa el tránsito desde una orientación centrada principalmente en la automatización y la eficiencia hacia una perspectiva sociotécnica basada en la colaboración entre personas y máquinas. Este marco permite comprender la Agricultura 5.0 como la aplicación de tecnologías digitales avanzadas a sistemas biológicos y territoriales, bajo criterios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia.

La industria 5.0 y su relación con la agricultura. La Agricultura 5.0 puede entenderse como la aplicación de los principios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia de la Industria 5.0 a los sistemas agroalimentarios. Este enfoque integra tecnologías digitales —como sensores, Internet de las cosas, inteligencia artificial, robótica, drones, gemelos digitales y análisis de datos— con conocimientos agronómicos, capacidades organizativas y saberes territoriales. Su finalidad no es automatizar la producción por sí misma, sino mejorar la calidad de las decisiones y generar valor económico, ambiental y social para los actores del sistema agroalimentario (Fountas et al. 2024; Haloui et al. 2024; Sharma et al. 2024).

La relación entre la Industria 5.0 y la Agricultura 5.0 no consiste en transferir directamente tecnologías industriales al campo. Los sistemas agrícolas están sujetos a variaciones biológicas, climáticas, edáficas y territoriales que no pueden controlarse completamente. Por ello, las tecnologías deben adaptarse a las condiciones específicas de cada unidad productiva y complementarse con el conocimiento de los productores, los técnicos y los servicios de extensión.

En el manejo del suelo, esta integración puede apoyar el monitoreo espacio-temporal de variables como la humedad, la temperatura, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de nutrientes, la cobertura y la variabilidad del terreno. También puede contribuir a ajustar el riego, la fertilización y otras prácticas de manejo. Sin embargo, la utilidad de estas herramientas depende de la calidad de los datos, la conectividad, la capacidad de interpretación y la validación agronómica de las recomendaciones.

La Agricultura 5.0 articula, por tanto, automatización con supervisión humana, análisis algorítmico con conocimiento local, innovación productiva con protección ambiental y conectividad digital con participación rural. Su aporte debe evaluarse no solo por el aumento de la eficiencia técnica, sino también por sus efectos sobre la conservación del suelo, el uso de los recursos naturales, la inclusión de los pequeños productores y la capacidad de adaptación de los sistemas agroalimentarios.

Capital humano e innovación tecnológica. La innovación tecnológica comprende la creación, adopción y combinación de dispositivos, plataformas, procedimientos y formas de organización que modifican las prácticas agrícolas. No obstante, la disponibilidad de tecnología no garantiza por sí misma mejores resultados. Sus beneficios dependen de las capacidades de los usuarios para comprender la información, evaluar las recomendaciones y adaptarlas a las condiciones productivas y territoriales (Gumbi et al. 2023; Bálint et al. 2024).

En esta revisión, el capital humano se entiende como el conjunto de conocimientos, experiencias, habilidades digitales, capacidades analíticas y competencias organizativas disponibles entre productores, trabajadores, técnicos, extensionistas y administradores. Estas capacidades

funcionan como una condición habilitante de la Agricultura 5.0, porque permiten convertir los datos generados por sensores, plataformas y algoritmos en decisiones productivas pertinentes.

La inteligencia artificial centrada en las personas requiere que los usuarios puedan interpretar sus resultados, reconocer posibles errores o sesgos y aportar conocimiento contextual. En consecuencia, las competencias necesarias no son únicamente operativas; también incluyen pensamiento crítico, conocimientos agronómicos, comprensión de la protección de datos, capacidad para trabajar con sistemas automatizados y disposición para participar en procesos de aprendizaje continuo (Holzinger et al. 2024; Liu et al. 2024).

En el manejo del suelo, estas competencias permiten interpretar mapas, sensores y modelos predictivos, contrastar sus recomendaciones con la observación directa del terreno y decidir cuándo modificar las prácticas de riego, fertilización o conservación. Por ello, la capacitación debe superar el aprendizaje instrumental de una herramienta y fortalecer la capacidad de análisis, la autonomía tecnológica, la cooperación entre productores y la gestión colectiva de la información.

La formación de productores y técnicos debe articularse con los servicios de extensión, las asociaciones rurales, las cooperativas y las instituciones de investigación. Este acompañamiento es especialmente importante para los pequeños productores, quienes pueden enfrentar limitaciones de conectividad, financiación, infraestructura, soporte técnico y acceso a los mercados (Gumbi et al. 2023). Así, el capital humano no constituye un complemento de la innovación tecnológica, sino una condición estratégica para que la Agricultura 5.0 contribuya a sistemas productivos sostenibles, resilientes e inclusivos.

Diseño metodológico

Tipo de revisión y procedimiento general. Se realizó una revisión exploratoria de la literatura mediante un proceso sistematizado de búsqueda, selección, organización y síntesis de documentos científicos. El reporte metodológico se estructuró con base en los elementos aplicables de la declaración PRISMA 2020 (Page et al. 2021).

PRISMA se utilizó como guía para transparentar las etapas de identificación, selección y síntesis de la información. Debido al tamaño reducido y a la heterogeneidad conceptual del corpus, no se realizó un metaanálisis ni se estimaron efectos cuantitativos. Los resultados se presentan mediante síntesis temática y análisis descriptivo.

Fuentes de información y periodo de búsqueda. La búsqueda documental se realizó en repositorios institucionales y plataformas editoriales y académicas, entre ellas la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la Comisión Europea, IOS Press, Wiley Online Library, MDPI, SAGE Journals, SpringerLink e IEEE Xplore. Se consideraron publicaciones comprendidas entre 2019 y 2025. El año 2019 se estableció como límite inferior para delimitar el análisis al periodo reciente de desarrollo conceptual de la Industria 5.0 y la Agricultura 5.0. La búsqueda se orientó a identificar documentos relacionados con tecnologías digitales, manejo agrícola, capital humano, sostenibilidad, resiliencia y condiciones institucionales

Estrategia de búsqueda. La estrategia de búsqueda se organizó mediante combinaciones de términos relacionados con la Industria 5.0, la Agricultura 5.0, los sistemas agrícolas, las tecnologías digitales y el manejo sostenible del suelo. La ecuación de búsqueda principal fue:

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

("Industry 5.0" OR "Agriculture 5.0" OR "Industry-Agriculture 5.0")
AND
(agricultur* OR farming OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR agroecosystem*)
AND
(soil OR "soil health" OR "soil management" OR "soil quality" OR "digital soil mapping")
AND
("artificial intelligence" OR "Internet of Things" OR "digital twin*" OR robotics OR automation OR "big data" OR "cloud computing")

Los términos relacionados con capital humano, competencias digitales, sostenibilidad, resiliencia, inclusión y gobernanza de datos se utilizaron como categorías de selección y extracción de información. Esta decisión permitió evitar la exclusión de documentos relevantes que abordaran dichos temas utilizando expresiones diferentes. La sintaxis de la ecuación se adaptó a las características de cada plataforma consultada. Se eliminaron los registros duplicados y se revisó la pertinencia temática de los documentos recuperados.

Criterios de inclusión y exclusión. Se incluyeron documentos que cumplieran los siguientes criterios: 1. Publicaciones académicas o institucionales relacionadas con la Industria 5.0 o la Agricultura 5.0; 2. Estudios publicados entre 2019 y 2025; 3. Documentos con aplicación directa o potencial en sistemas agrícolas; 4. Trabajos que abordaran tecnologías digitales, manejo del suelo, uso eficiente de recursos, capital humano, sostenibilidad, resiliencia o inclusión rural y, 5. Publicaciones con información suficiente para identificar sus objetivos, aportes y principales conclusiones.

Se excluyeron: 1. Documentos centrados exclusivamente en manufactura sin aplicación agrícola; 2. Estudios limitados a Agricultura 4.0 que no incorporaran centralidad humana, sostenibilidad o resiliencia; 3. Registros duplicados; 4. Documentos sin relación directa con el objetivo de la revisión y, 5. Publicaciones cuya información no permitiera establecer su aporte al análisis.

Selección y composición del corpus. Durante el proceso de selección se examinaron 29 documentos. De este conjunto, 27 fueron incorporados a la revisión general y dos fueron excluidos por falta de relación temática con la Agricultura 5.0 y el manejo agrícola. De los 27 documentos incluidos, 14 conformaron el corpus analítico principal por su relación directa con las tecnologías de la Agricultura 5.0, la innovación tecnológica, el capital humano, la sostenibilidad y las condiciones de adopción. Los 13 documentos restantes se utilizaron como apoyo teórico, institucional o metodológico. Este grupo estuvo integrado por nueve referencias teóricas, tres documentos institucionales y una referencia metodológica. En consecuencia, el análisis diferenció entre el corpus analítico principal y las referencias complementarias. Las publicaciones excluidas no se utilizaron para sustentar los resultados ni la discusión.

Extracción y análisis de la información. La información se organizó en una matriz de análisis que incluyó autoría, año de publicación, región o país, tipo de documento, tecnología estudiada, aplicación agrícola, relación con el suelo, beneficios productivos y ambientales, capacidades humanas requeridas, barreras de adopción e implicaciones éticas, políticas e institucionales. Posteriormente, se realizó una síntesis temática del corpus analítico. Las categorías de análisis fueron:

1. Tecnologías habilitadoras; 2. Aplicaciones agrícolas y edáficas; 3. Productividad y eficiencia en el uso de recursos; 4. Sostenibilidad y resiliencia; 5. Capital humano y competencias digitales; 6. Inclusión de pequeños productores; 7. Gobernanza de datos y, 8. Barreras institucionales y territoriales.

La distribución geográfica de las publicaciones se examinó de manera descriptiva. Cada documento se contabilizó una sola vez. Cuando las afiliaciones de los autores correspondían a distintas regiones, el documento se clasificó como interregional. Esta clasificación describe únicamente el corpus seleccionado y no representa la producción científica mundial sobre Agricultura 5.0.

Mapa conceptual exploratorio. Como complemento de la síntesis temática, se elaboró un mapa exploratorio de relaciones conceptuales mediante el software VOSviewer. Antes de construir la red, se normalizaron términos equivalentes y se agruparon las categorías relacionadas con tecnologías, aplicaciones, impactos, capital humano y condiciones de adopción.

El mapa se construyó a partir de los términos y categorías extraídos de los 14 documentos del corpus analítico principal. Debido a que no se utilizaron exportaciones bibliográficas completas de Scopus o Web of Science, la figura no se interpreta como un análisis bibliométrico convencional. VOSviewer se empleó como herramienta de visualización exploratoria de las relaciones conceptuales identificadas en la síntesis temática. Por esta razón, el tamaño de los nodos, la proximidad entre términos y la fuerza de los enlaces representan relaciones conceptuales dentro del corpus estudiado y no frecuencias bibliométricas de la producción científica mundial.

RESULTADOS

Composición del corpus documental.

El conjunto documental examinado estuvo compuesto por 29 documentos. De ellos, 27 fueron incluidos en la revisión y dos fueron excluidos por no presentar relación directa con la Agricultura 5.0, la Industria 5.0 o los sistemas agrícolas. Los 27 documentos incluidos se organizaron en un corpus analítico principal y un corpus complementario. El corpus analítico principal estuvo integrado por 14 documentos relacionados directamente con las tecnologías de la Agricultura 5.0, la innovación tecnológica, la sostenibilidad, el capital humano y las condiciones de adopción. El corpus complementario estuvo constituido por nueve documentos teóricos, tres documentos institucionales y una referencia metodológica (Tabla 1).

Tabla 1. Composición del corpus documental.

Categoría documental	Número	Porcentaje	Función en el artículo
Corpus analítico principal	14	51.90	Sustenta el análisis de tecnologías, aplicaciones, sostenibilidad, capital humano y adopción.
Referencias teóricas complementarias	9	33.30	Apoyan la fundamentación conceptual y la discusión
Documentos institucionales	3	11.10	Definen los principios de centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia
Referencia metodológica	1	3.70	Sustenta el reporte conforme a PRISMA 2020
Total de documentos incluidos	**27**	**100**	

Nota: Los porcentajes se calcularon sobre los 27 documentos incluidos. Los dos documentos excluidos representan el 6,9 % del conjunto documental examinado de 29 documentos.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

El corpus analítico principal representó el 51,9 % de los documentos incluidos. Esto indica que una proporción importante de la argumentación conceptual se apoyó en referencias complementarias, institucionales o metodológicas. Por tanto, los resultados derivados directamente de estudios sobre Agricultura 5.0 deben diferenciarse de los conceptos provenientes de literatura general sobre Industria 5.0, capital humano y sostenibilidad.

Distribución regional del corpus analítico.

La distribución regional se analizó sobre los 14 documentos del corpus analítico principal. La clasificación se realizó según la región de afiliación institucional de los autores. Cuando un documento incluyó instituciones pertenecientes a más de una región, se clasificó como interregional (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución regional de las afiliaciones institucionales del corpus analítico.

Región de afiliación institucional	Cantidad de publicaciones	%	Temas centrales
Asia	5	35.70	Inteligencia artificial, Internet de las cosas, agricultura inteligente y producción sostenible.
Europa	3	21.40	Competencias digitales, centralidad humana y colaboración humano-máquina.
África	2	14.30	Pequeños productores, brecha digital e inclusión tecnológica.
Afiliaciones interregionales	4	28.60	Agricultura de precisión, automatización, robótica, redes 6G y cooperación científica.
Total	**14**	**100**	

Nota: La distribución corresponde a las afiliaciones institucionales de los documentos seleccionados y no representa la ubicación mundial de la investigación sobre Agricultura 5.0 ni la totalidad de la literatura disponible.

Asia constituyó la categoría individual con mayor representación, con cinco documentos, equivalentes al 35,7 % del corpus analítico. Europa aportó tres documentos y África dos. Los estudios con afiliaciones interregionales representaron el 28,6 %, lo que evidencia la presencia de colaboraciones académicas entre instituciones de diferentes regiones. Sin embargo, estos datos no permiten afirmar que Asia domine la producción científica mundial ni que todas las redes interregionales conecten simultáneamente Asia, Europa, África y América Latina. La presencia latinoamericana fue limitada y se identificó principalmente en estudios de colaboración internacional, incluido un trabajo relacionado con Colombia. Asimismo, los resultados correspondientes a África deben interpretarse como tendencias del corpus seleccionado y no como características generales de la investigación africana.

Tecnologías y aplicaciones identificadas. Los 14 documentos del corpus analítico describieron diversas tecnologías asociadas con la Agricultura 5.0. Entre ellas se identificaron el Internet de las cosas, la inteligencia artificial, los gemelos digitales, la robótica, los drones, blockchain, el análisis de grandes volúmenes de datos, la computación en la nube, la realidad extendida y las comunicaciones 6G.

La Tabla 3 presenta una síntesis temática de sus aplicaciones, contribuciones potenciales y limitaciones. La tabla no establece una clasificación de eficacia ni permite afirmar qué tecnología es predominante, porque no se calculó el número de documentos que mencionó cada tecnología. En conjunto, los documentos relacionaron las tecnologías digitales con cuatro funciones principales: monitoreo, predicción, automatización y apoyo a la toma de decisiones. Sin embargo, también señalaron que su implementación depende de condiciones habilitantes como conectividad, financiación, soporte técnico, competencias digitales, interoperabilidad y gobernanza de datos.

Tabla 3. Tecnologías y aplicaciones asociadas con la Agricultura 5.0

Tecnología	Aplicaciones agrícolas y edáficas descritas	Contribuciones potenciales	Limitaciones identificadas
Internet de las cosas	Monitoreo de humedad, temperatura, variables del suelo, cultivos y animales.	Captura de datos en tiempo real y apoyo al uso eficiente de recursos	Conectividad insuficiente, falta de interoperabilidad y costos de implementación
Inteligencia artificial	Predicción de rendimientos, plagas, enfermedades y necesidades de riego.	Apoyo a la predicción de riesgos y a la toma de decisiones.	Sesgos, baja explicabilidad y dependencia de la calidad de los datos.
Gemelos digitales	Simulación de cultivos, suelos, maquinaria y escenarios climáticos.	Evaluación virtual de alternativas y reducción de riesgos.	Complejidad técnica y necesidad de datos confiables.
Robótica y drones	Siembra, monitoreo, aplicación de insumos, cosecha y control de malezas.	Automatización de tareas repetitivas o peligrosas y aplicación localizada.	Inversión inicial, mantenimiento, regulación y posible transformación del empleo.
Blockchain	Trazabilidad de productos, transacciones y verificación de origen.	Mayor transparencia y confianza en las cadenas agroalimentarias.	Problemas de escalabilidad, consumo energético y regulación.
Big data y computación en la nube	Integración y análisis de datos provenientes de sensores, satélites, clima y unidades productivas.	Identificación de patrones y apoyo a decisiones complejas.	Propiedad, privacidad, concentración y seguridad de los datos.
Realidad extendida y comunicaciones 6G	Capacitación, asistencia remota e interacción con maquinaria.	Formación inmersiva, comunicación de baja latencia y colaboración a distancia.	Costos, cobertura, infraestructura y necesidad de nuevas competencias.

Nota: Elaboración propia a partir de la matriz de análisis documental. Las contribuciones se presentan como posibilidades descritas en la literatura y no como efectos comprobados en todos los sistemas agrícolas.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

Relaciones conceptuales del corpus. La Figura 1 presenta una representación descriptiva de la composición del corpus y de sus principales categorías. Debido a que se construyó a partir de la clasificación documental, debe interpretarse como un recurso de organización visual y no como una medición bibliométrica.

La Figura 2 presenta el mapa exploratorio de relaciones conceptuales elaborado con VOSviewer a partir de los términos y categorías extraídos de los 14 documentos del corpus analítico. La representación muestra asociaciones entre Industria 5.0, Agricultura 5.0, inteligencia artificial, Internet de las cosas, robótica, automatización, gemelos digitales, productividad, sostenibilidad, resiliencia, capital humano y competencias digitales.

La posición central de las categorías Industria 5.0 y Agricultura 5.0 debe interpretarse con cautela, porque ambas fueron utilizadas como categorías organizadoras de la revisión. Por ello, su proximidad con otras categorías representa relaciones identificadas en la matriz de análisis, pero no demuestra causalidad ni superioridad científica.

La red conceptual sugiere que la transición hacia la Agricultura 5.0 se presenta en la literatura como un proceso condicionado por la interacción entre tecnología, conocimiento agronómico, capacidades humanas y contextos institucionales. Los documentos también relacionan la adopción tecnológica con la conectividad rural, la formación, la gobernanza de datos, la inclusión de pequeños productores y la protección ambiental.

En relación con el suelo, el corpus vincula algunas tecnologías con el monitoreo de humedad, temperatura, nutrientes y variabilidad espacial. No obstante, la evidencia edáfica no fue cuantificada de manera independiente. Por tanto, los resultados permiten identificar una conexión conceptual entre Agricultura 5.0 y manejo del suelo, pero no permiten estimar sus efectos sobre calidad, fertilidad, carbono orgánico, erosión o productividad del suelo.

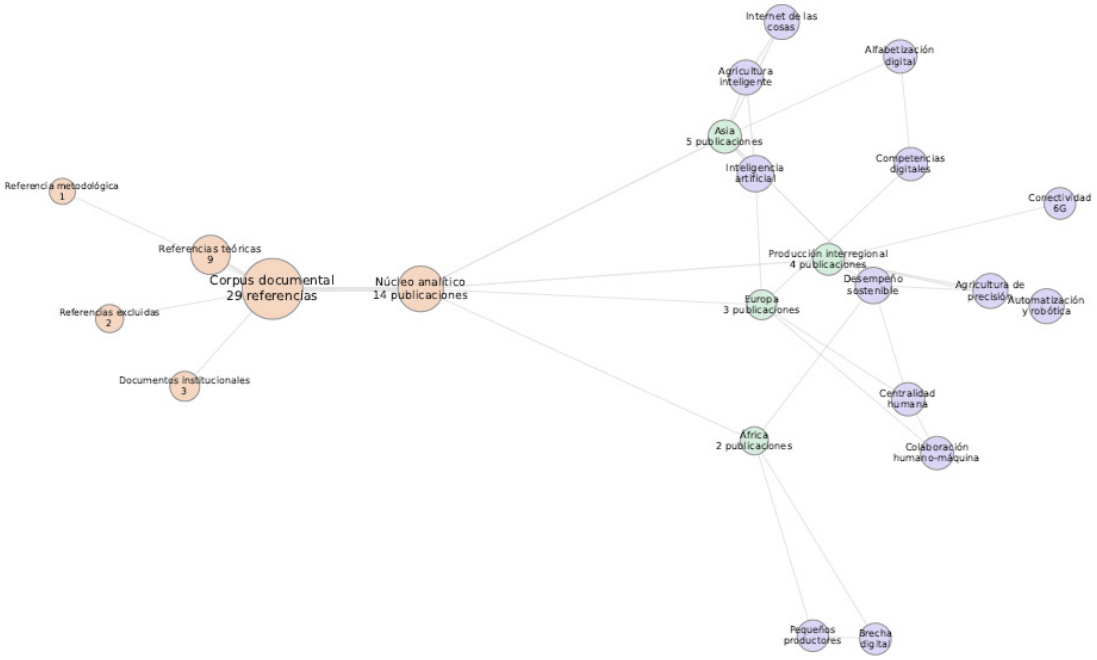


Figura 1. Diagrama del proceso de selección documental conforme a PRISMA 2020

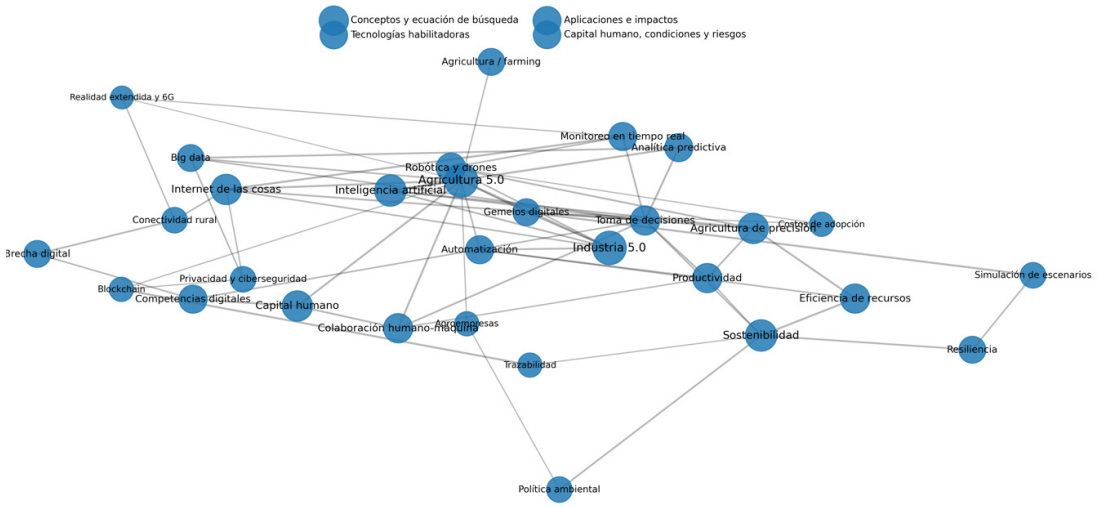


Figura 2. Mapa exploratorio de relaciones conceptuales sobre Industria 5.0 y Agricultura 5.0

DISCUSIÓN

Tecnologías digitales, toma de decisiones y manejo del suelo. El corpus analizado describe la Agricultura 5.0 como una integración de sensores, Internet de las cosas, inteligencia artificial, gemelos digitales, robótica, drones y análisis de datos. Estas tecnologías se presentan como herramientas para mejorar el monitoreo de los sistemas productivos, anticipar riesgos y apoyar la toma de decisiones (Sharma et al. 2024; Taha et al. 2025).

El Internet de las cosas permite recopilar información sobre variables ambientales, cultivos, animales y condiciones del suelo. Esta información puede alimentar modelos de inteligencia artificial para identificar patrones y apoyar decisiones relacionadas con el riego, la fertilización, el control de enfermedades y la planificación de labores. Los gemelos digitales, por su parte, permiten representar parcelas, cultivos, maquinaria y escenarios productivos para evaluar alternativas antes de aplicarlas en campo (Böğrekçi & Demircioğlu 2025). Sin embargo, la disponibilidad de datos no garantiza decisiones adecuadas. La utilidad de estas tecnologías depende de la calidad de los datos, la calibración de los sensores, la validación de los modelos y la supervisión agronómica. En el caso del suelo, las herramientas digitales pueden apoyar el monitoreo de humedad, temperatura, nutrientes y variabilidad espacial, pero la revisión no aporta evidencia suficiente para afirmar que su uso mejore directamente la fertilidad, el carbono orgánico, la estructura, la erosión o la salud del suelo.

Eficiencia y colaboración entre personas y máquinas. La literatura revisada relaciona la Agricultura 5.0 con una mayor precisión en el uso del agua, los fertilizantes y los productos fitosanitarios. No obstante, estos beneficios deben interpretarse como contribuciones potenciales y no como efectos garantizados, debido a que dependen de las condiciones técnicas, económicas y territoriales de cada sistema productivo.

Demircioğlu et al. (2024) plantean la autonomación como la integración de procesos automatizados con sistemas de supervisión capaces de detectar anomalías y solicitar la intervención humana. Este enfoque resulta especialmente pertinente en la agricultura, donde las condiciones climáticas, biológicas y edáficas cambian constantemente.

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

La automatización puede apoyar tareas repetitivas, peligrosas o de alta precisión, pero no elimina la necesidad de conocimiento agronómico ni de decisiones contextualizadas. Por tanto, la relación entre personas y máquinas debe orientarse a complementar capacidades. La tecnología puede procesar grandes volúmenes de información y ejecutar operaciones repetitivas, mientras que los productores y técnicos interpretan los resultados, reconocen situaciones no previstas y ajustan las recomendaciones a las condiciones reales del terreno.

Sostenibilidad, grupos de interés y gobernanza. La sostenibilidad de la Agricultura 5.0 no puede evaluarse únicamente mediante productividad o reducción de insumos. Guo et al. (2023) plantean que el desempeño de las empresas agrarias debe considerar simultáneamente dimensiones económicas, ambientales y sociales, así como las expectativas de trabajadores, comunidades, consumidores, gobiernos y otros grupos de interés.

En la misma línea, Zhang (2024) señala que la innovación tecnológica puede contribuir a la eficiencia y a la gestión ambiental cuando está acompañada por políticas, incentivos y normas coherentes. Sin embargo, la adopción tecnológica también implica costos de inversión, mantenimiento, dependencia de proveedores, transformación del empleo, concentración de datos y posibles desigualdades en la distribución de beneficios. En consecuencia, una tecnología puede ser eficiente desde el punto de vista productivo y, al mismo tiempo, generar efectos sociales o territoriales negativos. La sostenibilidad requiere considerar quién controla los datos, quién puede acceder a las herramientas, quién asume los costos y quién recibe los beneficios. Esta perspectiva es especialmente relevante para los pequeños productores y para las comunidades rurales con limitaciones de conectividad, financiación y asistencia técnica.

Capital humano e inclusión rural. La revisión muestra que el capital humano funciona como una condición habilitante de la Agricultura 5.0. Los datos generados por sensores, plataformas y algoritmos deben ser interpretados y convertidos en decisiones productivas. Por ello, la alfabetización digital debe complementarse con conocimientos agronómicos, pensamiento crítico, capacidad analítica y comprensión de los riesgos asociados con la automatización y la gestión de datos.

Holzinger et al. (2024) proponen una inteligencia artificial centrada en las personas, en la cual el agricultor participa en la interpretación de los resultados, identifica posibles errores y aporta conocimiento contextual. Esta perspectiva es relevante para el manejo del suelo, porque las recomendaciones digitales deben contrastarse con la observación directa del terreno y con la experiencia acumulada por los productores.

Liu et al. (2024) relacionan la alfabetización digital con prácticas de producción ambientalmente responsables. Sus resultados sugieren que la capacitación no debe limitarse al uso instrumental de dispositivos, sino que debe fortalecer la comprensión de los procesos productivos y ambientales. De manera complementaria, Gumbi et al. (2023) identifican la conectividad, la infraestructura, los costos, la asesoría y el acceso a los mercados como condiciones importantes para la adopción de tecnologías digitales por parte de pequeños productores. Por ello, la inclusión requiere programas de formación continua, servicios de extensión, soluciones de bajo costo, plataformas adaptadas a conectividad limitada y modelos de acceso colectivo mediante cooperativas, asociaciones y organizaciones rurales.

Implicaciones para la ciencia del suelo. Desde la perspectiva de la ciencia del suelo, la Agricultura 5.0 ofrece herramientas para mejorar el monitoreo espacial y temporal de las condiciones edáficas y para apoyar decisiones de manejo localizado. Sin embargo, el corpus analizado aborda el suelo principalmente como una fuente de datos o como parte del sistema productivo, y no como un resultado central de evaluación.

La evidencia disponible no permite concluir que la Agricultura 5.0 mejore por sí misma la calidad, fertilidad, estructura o salud del suelo. Para establecer estos efectos se requieren estudios de campo, diseños comparativos y evaluaciones longitudinales que midan variables como carbono orgánico, estabilidad estructural, disponibilidad de nutrientes, infiltración, erosión, salinidad y eficiencia en el uso del agua. Esta limitación debe reconocerse claramente para evitar que el artículo atribuya a las tecnologías beneficios edáficos que todavía no han sido demostrados de forma suficiente.

Implicaciones institucionales y agenda de investigación. La adopción sostenible de la Agricultura 5.0 requiere instituciones capaces de regular la protección de datos, la interoperabilidad, la ciberseguridad y la distribución de beneficios. También es necesario desarrollar políticas que apoyen la conectividad rural, la financiación, la formación y el acceso de pequeños productores a servicios tecnológicos compartidos.

Las investigaciones futuras deberían evaluar, mediante estudios empíricos y longitudinales, los efectos productivos, ambientales, laborales y económicos de estas tecnologías. También deberían analizar la propiedad de los datos agrícolas, el consentimiento, la privacidad, la dependencia tecnológica y la participación de los productores en el diseño de las soluciones.

CONCLUSIONES

La revisión exploratoria muestra que la Agricultura 5.0 no debe entenderse como la simple incorporación de inteligencia artificial, Internet de las cosas, robótica, drones, gemelos digitales, blockchain y análisis de datos. Su principal diferencia consiste en articular estas tecnologías con la centralidad humana, la sostenibilidad y la resiliencia propias del enfoque de Industria 5.0.

Las tecnologías revisadas pueden apoyar el monitoreo de cultivos, recursos y variables del suelo, así como la predicción de riesgos y la toma de decisiones agrícolas. No obstante, sus beneficios son potenciales y dependen de la calidad de los datos, la conectividad, la financiación, el soporte técnico, la validación agronómica y las condiciones institucionales.
El capital humano constituye una condición fundamental para que la transformación tecnológica produzca resultados pertinentes. Las competencias digitales deben integrarse con conocimientos agronómicos, capacidad analítica, pensamiento crítico, criterios éticos y habilidades para trabajar con sistemas automatizados. La extensión agropecuaria, la formación continua y el fortalecimiento de las organizaciones rurales son necesarios para favorecer la inclusión de los pequeños productores.

La revisión también evidencia riesgos relacionados con la brecha digital, la dependencia tecnológica, la concentración de datos, la ciberseguridad, la transformación del empleo y la desigual distribución de beneficios. Por ello, la regulación debe promover la protección de datos, la interoperabilidad, la transparencia, la participación de los productores y el acceso equitativo a las tecnologías.

En relación con el suelo, la Agricultura 5.0 puede contribuir al monitoreo y al manejo

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 36-51. https://doi.org/10.47864/se552025p3651

localizado de agua, nutrientes y otras variables edáficas. Sin embargo, el corpus analizado no ofrece evidencia suficiente para demostrar mejoras directas en la salud, fertilidad, estructura o conservación del suelo. Esta constituye una de las principales limitaciones del estudio y una prioridad para futuras investigaciones.

Entre las limitaciones de la revisión se encuentran el carácter exploratorio y descriptivo del análisis, el tamaño reducido del corpus analítico, compuesto por 14 documentos, la heterogeneidad de las fuentes y la ausencia de exportaciones bibliográficas completas de Scopus o Web of Science. También fue limitada la evidencia empírica y longitudinal sobre rentabilidad, empleo, adopción tecnológica y resultados edáficos.

En síntesis, la Agricultura 5.0 puede contribuir a sistemas agrícolas más productivos, sostenibles y resilientes cuando la innovación tecnológica se articula con el capital humano, el conocimiento agronómico, la gobernanza institucional y la inclusión de los pequeños productores. La tecnología, por sí sola, no garantiza estos resultados.

REFERENCIAS

Bálint, L. P., Botos, S., & Várallyai, L. (2024). Towards Agriculture 5.0 in the European Union: Training and digital skill trends in the agricultural sector. *CEUR Workshop Proceedings, 3930*, 46–50. https://ceur-ws.org/Vol-3930/paper8.pdf

Barrios-Ulloa, A., Solano-Barliza, A., Arrubla-Hoyos, W., Ojeda-Beltrán, A., Cama-Pinto, D., Arrabal-Campos, F. M., & Cama-Pinto, A. (2025). Agriculture 5.0 in Colombia: Opportunities through the emerging 6G network. *Sustainability, 17*(15), Article 6664. https://doi.org/10.3390/su17156664

Böğrekçi, I., & Demircioğlu, P. (2025). Advancements in Industry-Agriculture 5.0: Utilizing unmanned ground and aerial vehicles for sustainable precision agriculture. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, 19*(4), 35–51. https://doi.org/10.14313/jamris-2025-034

Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry* (Report No. KI-BD-20-021-EN-N). Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. https://doi.org/10.2777/308407

Demircioğlu, P., Böğrekçi, I., Durakbaşa, M. N., & Bauer, J. (2024). Autonomation, automation, AI, and Industry-Agriculture 5.0 in sustainable agro-ecological food production. In N. M. Durakbaşa & M. G. Gençyılmaz (Eds.), *Industrial engineering in the Industry 4.0 era* (pp. 545–556). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53991-6_42

European Commission. (2021, January 7). *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industrial-model-2021-01-07_en

European Commission. (2025). *Industry 5.0: Research and innovation*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en

Fountas, S., Espejo-García, B., Kasimati, A., Gemtou, M., Panoutsopoulos, H., & Anastasiou, E. (2024). Agriculture 5.0: Cutting-edge technologies, trends, and challenges. *IT Professional, 26*(1), 40–47. https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3358972

Gamberini, L., & Pluchino, P. (2024). Industry 5.0: A comprehensive insight into the future of work, social sustainability, sustainable development, and career. *Australian Journal of Career Development, 33*(1), 5–14. https://doi.org/10.1177/10384162241231118

Gumbi, N., Gumbi, L., & Twinomurinzi, H. (2023). Towards sustainable digital agriculture for smallholder farmers: A systematic literature review. *Sustainability, 15*(16), Article 12530. https://doi.org/10.3390/su151612530

Guo, L., Sun, D., Warraich, M. A., & Waheed, A. (2023). Does Industry 5.0 model optimize sustainable performance of agri-enterprises? Real-time investigation from the realm of stakeholder theory and domain. *Sustainable Development, 31*(4), 2507–2516. https://doi.org/10.1002/sd.2527

Haloui, D., Oufaska, K., Oudani, M., & El Yassini, K. (2024). Bridging Industry 5.0 and Agriculture 5.0: Historical perspectives, opportunities, and future perspectives. *Sustainability, 16*(9), Article 3507. https://doi.org/10.3390/su16093507

Holzinger, A., Fister, I., Jr., Fister, I., Kaul, H.-P., & Asseng, S. (2024). Human-centered AI in smart farming: Toward Agriculture 5.0. *IEEE Access, 12*, 62199–62214. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3395532

Huma, S., Muslim, S., & Ahmed, W. (2024). Understanding the role of organizational intellectual capital on developing absorptive capacity to strategize innovation ambidexterity. *Review of International Business and Strategy, 34*(3), 433–453. https://doi.org/10.1108/RIBS-08-2023-0088

Liu, X., Wang, Z., & Han, X. (2024). The impact of digital literacy on farmers' green production behavior: Mediating effects based on ecological cognition. *Sustainability, 16*(17), Article 7507. https://doi.org/10.3390/su16177507

Narkhede, G., Pasi, B., Rajhans, N., & Kulkarni, A. (2023). Industry 5.0 and the future of sustainable manufacturing: A systematic literature review. *Business Strategy & Development, 6*(4), 704–723. https://doi.org/10.1002/bsd2.272

Ospina Nieto, Y. (Ed.). (2025). *Industria 5.0 y capital humano: Innovación, competencias y desafíos éticos en la transformación organizacional*. Editorial Universidad Santiago de Cali. https://doi.org/10.35985/9786287770911

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, Article n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Parashar, S., Raj, S., Srivastava, P., & Singh, A. K. (2024). Comparative toxicity assessment of selected nanoparticles using different experimental model organisms. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods, 130*, Article 107563. https://doi.org/10.1016/j.vascn.2024.107563

Rame, R., Purwanto, P., & Sudarno, S. (2024). Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future. *Innovation and Green Development, 3*(4), Article 100173. https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173

Rani, R., Sri, N. S., Medishetti, R., Chatti, K., & Sevilimedu, A. (2024). Loss of FMRP affects ovarian development and behaviour through multiple pathways in a zebrafish model of fragile X syndrome. *Human Molecular Genetics, 33*(16), 1391–1405. https://doi.org/10.1093/hmg/ddae077

Razak, S. F. A., Yogarayan, S., Sayeed, M. S., & Mohd Derafi, M. I. F. (2024). Agriculture 5.0 and explainable AI for smart agriculture: A scoping review. *Emerging Science Journal, 8*(2), 744–760. https://doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-02-02

Rivera Méndez, Y. D., & Romero Angulo, H. M. (2021). Cenipalma 30 años: El Centro de Investigación es motor en la construcción y fortalecimiento de capital humano para Colombia. *El Palmicultor*. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/13622

Sardana, D., Dhaigude, A., & Gupta, N. (2023). What mediate cognitive capital and organization projects performance in international partner projects. In *Academy of Management Proceedings* (Vol. 2023, No. 1, Article 16413). Academy of Management. https://doi.org/10.5465/AMPROC.2023.16413abstract

Sharma, A., Singh, S. K., Kumar, S., Thakur, R., Gupta, B. B., & Arya, V. (2024). IoT-enabled smart farming with Industry 5.0. *Journal of High Speed Networks, 30*(3), 477–496. https://doi.org/10.3233/JHS-230258

Szara, K. (2025). Resilience in Industry 5.0: Systematic literature review. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, 224*, 523–550. https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A4%3A2593300/o%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A186514696&crl=c&link_origin=scholar.google.com

Taha, M. F., Mao, H., Zhang, Z., Elmasry, G., Awad, M. A., Abdalla, A., Mousa, S., Elwakeel, A. E., & Elsherbiny, O. (2025). Emerging technologies for precision crop management towards Agriculture 5.0: A comprehensive overview. *Agriculture, 15*(6), Article 582. https://doi.org/10.3390/agriculture15060582

Valyan, A., Farsi, S., & Sherafati, N. (2024). *Analyzing the relationship between cognitive capital skills and performance metrics of call center employees: An exploratory study* [Preprint]. Preprints.org. https://www.preprints.org/frontend/script/613f4655be76a9f6851d126a1979828b/download_pub

Zhang, Y. (2024). A path to sustainable development of agri-industries: Analysis of Agriculture 5.0 versus Industry 5.0 using stakeholder theory with moderation of environmental policy. *Sustainable Development, 32*(5), 4829–4843. https://doi.org/10.1002/sd.2923