

# Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores

## Agriculture 4.0: Use of precision technologies and applications for small producers

Ana Delfina Tovar-Quiroz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: [adtovar@sena.edu.co](mailto:adtovar@sena.edu.co)  
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0701-7561>

Recibido: 16-03-2023 Aceptado: 03-10-2023

**Cómo citar:** Tovar-Quiroz, Ana (2023). Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores. *Informador Técnico*, 87(2), 195-211.

<https://doi.org/10.23850/22565035.5536>

### Resumen

El concepto de agricultura 4.0 ha emergido como una evolución de la agricultura de precisión (AP) a través de la difusión del Internet de las cosas (IoT), la analítica de datos, y el *machine learning*, que han sido aplicados en toda la cadena de valor del sector agropecuario. Sin embargo, los desafíos que enfrenta la agricultura hoy en día van mucho más allá de los meramente tecnológicos. El logro de la meta Hambre Cero de aquí a 2030 exigirá que se utilicen aplicaciones de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI), primordiales para que el sector primario se convierta en impulsor del desarrollo económico y sostenible. En el presente artículo se presenta el concepto de agricultura 4.0, los contextos particulares de su uso, así como sus beneficios y principales tecnologías aplicadas en el sector, con el fin de evidenciar las tendencias de uso a nivel global. Para ello, se tomaron en cuenta artículos en idioma inglés, publicados en los últimos 5 años, tanto de revisión como de investigación. El Internet de las cosas, la analítica de datos, la inteligencia artificial y la computación en la nube, entre otras, han sido identificadas como las tecnologías más estudiadas en sistemas agrícolas. Se abre un abanico de oportunidades para seguir revisando innovaciones que sean específicas para las regiones y sus comunidades.

**Palabras clave:** agricultura inteligente; agricultura de precisión; Internet de las cosas; sensores; sensoramiento remoto.

### Abstract

The concept of agriculture 4.0 has emerged as an evolution of precision agriculture (PA) through the spread of the Internet of Things (IoT) and machine learning data analytics, which have been applied throughout the value chain of the agricultural sector. However, the challenges facing agriculture today go far beyond merely technological ones. Achieving the Zero-Hunger goal by 2030 will require the use of Science, Technology, and Innovation (STI) applications, essential for the primary sector to become a driver of economic and sustainable development. This article presents the concept of agriculture 4.0, the contexts of use, its technologies, their application in the agricultural sector, and the benefits to present the trends in the use of technologies at a global level. For this, English-language papers published in the last 5 years were considered, considering both review articles and research ones. Internet of Things, data analytics, artificial intelligence, and cloud computing,

among others, have been identified as the most studied technologies in both agricultural systems. The range of opportunities opens to continue reviewing innovations that are specific to the regions and their communities.

**Keywords:** Internet of Things; precision agriculture; smart farm; sensors; remote sensing.

## 1. Introducción

La industria 4.0 es un conjunto de tecnologías capaces de crear sistemas ciberfísicos dentro de la empresa y en la cadena de suministros, en donde el ciberespacio computacional sincroniza información de todos los procesos productivos con un poco de autonomía y acciones inteligentes (Zambon *et al.*, 2019; Rocha-Jácome *et al.*, 2021; Grabowska *et al.*, 2022; Mühl; de Oliveira, 2022). Con toda su extremada complejidad y oportunidades de innovación, este nuevo paradigma revolucionario se ha extendido al sector agrícola con la creación de la agricultura 4.0, la cual apropia conocimientos y se prepara para el futuro mediante la adopción de nuevas tecnologías como el Internet de las cosas, big data, computación en la nube, robótica avanzada e inteligencia artificial en la cadena de producción de los agronegocios (Mühl; de Oliveira, 2022).

Las revoluciones agrícolas anteriores fueron también radicales en su momento: la primera vio moverse a los cazadores recolectores hacia la agricultura sedentaria (agricultura 1.0), la segunda vio nuevas máquinas, como las cosechadoras de Jethro Tull (agricultura 2.0), y la tercera involucró cambios de producción en países en desarrollo con la revolución verde (agricultura 3.0), con la idea de utilizar nuevas tecnologías y el modelado basado en datos como herramienta esencial en la toma de decisiones en los sistemas de cultivo. En la actualidad, la agricultura 4.0 se refiere a diferentes conceptos y tecnologías conectadas con ideas de la cuarta revolución industrial (industria 4.0) (Rose; Chilvers, 2018; Zambon *et al.*, 2019; Grabowska *et al.*, 2022). El próximo paso hacia la agricultura 5.0 incluirá empresas integradas digitalmente, que confiarán sus procesos de producción a la robótica e inteligencia artificial, es decir, el trabajo conjunto entre humanos y robots universales, que promueva una nueva era de gestión inteligente del cultivo, con procesos de toma de decisiones automatizados, operaciones no tripuladas basadas en algoritmos de inteligencia artificial, aprendizaje autónomo y otras innovaciones tecnológicas que interactúen continuamente con el cultivo y su entorno (Adel, 2022; Mesías-Ruiz *et al.*, 2023).

Entre los diversos sectores económicos, la agricultura necesita asumir desarrollos tecnológicos que le permitan ganar ventajas competitivas y crecimiento económico; la cuarta revolución y por esta razón hay un espacio importante para una mayor difusión y adopción de tecnologías inteligentes, sin embargo, los desafíos que enfrenta hoy en día van mucho más allá de los meramente tecnológicos (Maffezzoli *et al.*, 2022), como el aumento de la población mundial prevista para 2050 (9,1 miles de millones), al igual que el incremento de la demanda de alimentos, el deterioro de los recursos naturales, el impacto del cambio climático en los sistemas agrícolas, el desperdicio de alimentos, y temporadas de cultivo irregulares por la escasez de agua, lo que inevitablemente condicionará la aparición de plagas y enfermedades, o el aumento de la gravedad de las ya existentes (Sharma *et al.*, 2021; Mesías-Ruiz *et al.*, 2023).

La agricultura 4.0 surgió cuando la telemática y el manejo de datos fueron combinados con el concepto de agricultura de precisión (AP) (Escamilla-García *et al.*, 2020), y lo que surgió fue un paso más en la integración de tecnologías geoespaciales, informática y digitalización de procesos agrícolas, donde se incorporaron sensores, telefonía móvil, computación en la nube, Internet de las cosas y *big data* a bordo de maquinaria autónoma (Zhai *et al.*, 2020; Mesías-Ruiz *et al.*, 2023).

De acuerdo con la definición oficial de la Sociedad Internacional para Agricultura de Precisión (2021), “la agricultura de precisión es una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otra información para respaldar las decisiones de gestión de acuerdo con la variabilidad estimada para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la

rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola”, que Integra tecnologías modernas para aumentar la rentabilidad de la finca, rendimientos del cultivo y sostenibilidad de operaciones agrícolas (Nowak, 2021; Campos *et al.*, 2022). Aunque el término está bien definido, su implementación es abismalmente diferente entre países desarrollados y en vía de desarrollo (Mizik, 2023).

El más grande desafío del sector agrícola es la integración de tecnologías de diversas áreas de conocimiento, que permitan una verdadera transformación digital en productos, servicios, procesos y nuevos modelos de negocio (Bentivoglio *et al.*, 2022; Rocha-Jácome *et al.*, 2021). Por lo tanto, es importante saber cuáles temas o contextos están siendo más estudiados, y las tecnologías de agricultura de precisión más implementadas. En este sentido, Maffezzoli *et al.* (2022) identificaron 10 dominios de aplicación: manejo del agua, monitoreo de cultivos, monitoreo microclimático, manejo de agroquímicos, monitoreo del suelo, monitoreo del ganado, cultivo en invernadero, sistemas de navegación y vehículos autónomos, hidroponía y acuaponía, y monitoreo de productos a lo largo de la cadena de valor. Dentro de las tecnologías habilitantes encontramos el Internet de las cosas (IoT), la analítica de datos y *big data*, inteligencia artificial, computación en la nube, entre otros. Klerkx *et al.* (2019) definieron cinco temas que relacionan la agricultura de precisión con el tema social: introducción y adaptación de tecnologías digitales en la finca, la digitalización y su efecto en los agricultores, poder y privacidad en la digitalización de sistemas de producción agrícola, sistemas de innovación agrícola, economía y cadena de valor. Lezoche *et al.* (2020) describieron seis áreas de avance en agricultura 4.0: tecnologías big data, Internet de las cosas, enfoques de modelo de conocimiento, inteligencia artificial y gestión específica en el sitio. Bertoglio *et al.* (2021), en su revisión sobre revolución de la agricultura digital, identificaron 5 corrientes de investigación: agricultura climática inteligente, manejo por sitio específico, uso de sensores remotos, Internet de las cosas e inteligencia artificial. El propósito de este artículo de revisión es describir las tecnologías emergentes de la agricultura de precisión como pilares de la agricultura 4.0, así como algunos retos importantes para su implementación.

## 2. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se analizaron más de 64 artículos científicos que engloban el concepto de agricultura 4.0 y tecnologías aplicadas en el área agrícola, los cuales fueron analizados de manera descriptiva. La principal herramienta de búsqueda fue Google, y las bases de datos que se utilizaron para la recolección de información fueron: Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI, por sus siglas en inglés), PubMed, Google Scholar, Scopus, Science Direct, Instituto Multidisciplinario de Publicaciones Digitales (MDPI, por sus siglas en inglés), Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), Elsevier y SciELO. Dentro de los criterios de inclusión de los artículos, se tuvo en cuenta que estuvieran en idioma inglés, en una base de datos científica, publicados formalmente entre los años 2018 y 2023, de investigación y revisión, y que abordaran el tema de agricultura 4.0 con la descripción de las tecnologías clave usadas en sistemas de cultivo. Una vez identificados los dominios o temas de estudio de la agricultura 4.0 más importantes, se procedió a ubicar las tecnologías más actuales en esos procesos agrícolas. Como criterio de exclusión, se tuvieron en cuenta estudios particulares con poco detalle y desactualizados, así como publicaciones relacionadas con aplicaciones de agricultura de precisión en el sector pecuario. Cabe señalar que la mayoría de los artículos revisados cumplían con los criterios establecidos, con información suficiente y relevante para incluirlos en este estudio. Las palabras utilizadas en la ecuación de búsqueda aplicada en las bases de datos mencionadas fueron las siguientes: “smart farming” OR “smart agriculture” OR “precision agriculture”, “artificial intelligence”, “agriculture 4.0”, “IoT technologies” “machine learning”, “image processing” “unmanned aerial vehicles”. Esta primera búsqueda permitió comprender, de manera general, el concepto de agricultura 4.0, la agricultura de precisión y su relación con las revoluciones industriales, estudios específicos sobre el tema, y tecnologías aplicadas, especialmente en cultivos.

### 3. Contextos de aplicación de tecnologías de agricultura de precisión

La agricultura es un conjunto de actividades relacionadas con el cultivo de plantas y el cuidado de los animales, de los cuales obtenemos alimentos, bebidas, fibras, energía, medicina y otros productos, por lo que necesitamos entender las actuales transformaciones agrícolas debido al impacto directo sobre el ambiente y la seguridad alimentaria (Mühl; de Oliveira, 2022). En este sentido, la industria y la agricultura no son sectores separados, pues la industria 4.0 llegó al campo en forma de agricultura 4.0, por lo tanto, la innovación de un sector afecta al otro; así, la agricultura digital o agricultura 4.0 representa la adopción de nuevas tecnologías como el Internet de las cosas, *big data*, computación en la nube, robótica e inteligencia artificial, las cuales tienen como objetivo aumentar la productividad (Mühl; de Oliveira, 2022). Para entender la agricultura 4.0, necesitamos saber qué temas se encuentran dentro de este campo de estudio. Klerkx *et al.* (2019) definieron cinco ejes temáticos: 1) identificación y adaptación de tecnologías digitales en la finca, 2) nuevas habilidades de los agricultores y la sofisticación del trabajo agrícola, 3) poder, privacidad y la ética de la agricultura digital, 4) conocimiento e innovación agrícola, y 5) economía y gestión de los sistemas de producción agrícola digitalizados. Lezorche *et al.* (2020) argumentaron seis áreas en agricultura 4.0: 1) tecnologías *big data*, 2) Internet de las cosas, 3) enfoques de modelos de conocimiento, 4) técnicas de inteligencia artificial, 5) agricultura inteligente, y 6) técnicas de agricultura de precisión y desarrollo de robots. En este sentido, este artículo presenta temas centrales de la agricultura 4.0, utilizando un enfoque temático. Los 10 principales temas en los cuales se aplica la agricultura 4.0 son el manejo del agua, monitoreo de cultivos, clima, manejo de fertilizantes y agroquímicos, monitoreo del suelo, cultivo en invernadero, sistemas de navegación con maquinaria, hidroponía, acuaponía y seguimiento del producto a lo largo de la cadena (Maffezzoli *et al.*, 2022) (Tabla 1). A continuación, se describen algunos.

**Tabla 1.** Contextos particulares de uso de las tecnologías de agricultura 4.0

Dominios de aplicación	Descripción	Referencias
Manejo del agua	Optimización del uso del agua, técnicas y procesos para la mejora del riego.	Kamienski <i>et al.</i> , 2019; García <i>et al.</i> , 2020; Monteleone <i>et al.</i> , 2020; Jabro <i>et al.</i> , 2020; Mohammed <i>et al.</i> , 2021.
Manejo de cultivos y monitoreo (crecimiento y sanidad)	Aplicación de tecnologías inteligentes en agricultura para el monitoreo de parámetros relacionados con el crecimiento del cultivo y la sanidad.	Barnes <i>et al.</i> , 2019; Hassan <i>et al.</i> , 2022; Lo Presti <i>et al.</i> , 2023.
Microclimática de precisión, predicción y seguimiento	Implica el control de los parámetros climáticos; asegura un crecimiento adecuado para cada tipo de planta.	Brenner <i>et al.</i> , 2018; Gaitán, 2020; Maffezzoli <i>et al.</i> , 2022.
Manejo de agroquímicos y fertilizantes	Manejo de insumos fundamentales en la agricultura: entradas y salidas; la mejora en la gestión y precisión de las tecnologías utilizadas.	Sharma <i>et al.</i> , 2021; Gao <i>et al.</i> , 2020; Campos <i>et al.</i> , 2022; Heitkämper <i>et al.</i> , 2023.
Monitoreo del suelo	Área de aplicación de tecnologías para el monitoreo, análisis y evaluación de la idoneidad del suelo.	Sharma <i>et al.</i> , 2021; Postolache <i>et al.</i> , 2022.
Cultivo en invernadero	Serie de aplicaciones específicas en el ámbito de la agricultura protegida y también agricultura vertical.	Escamilla-García <i>et al.</i> , 2020; Chen <i>et al.</i> , 2022.

Dominios de aplicación	Descripción	Referencias
Vehículos autónomos y sistema de navegación de maquinaria	Empleo de maquinaria y rotos autónomos para aumentar la eficiencia operativa en campo.	Kondoyanni <i>et al.</i> , 2022.
Hidroponía y acuaponía	Proporciona el uso eficiente del agua; plantas de cultivo sin suelo.	Wang <i>et al.</i> , 2018; Shi <i>et al.</i> , 2019; Alselek <i>et al.</i> , 2022.
Seguimiento del producto a lo largo de la cadena	Identifica y rastrea los elementos de un producto a medida que se mueve desde la materia prima hasta el producto terminado.	Navarro <i>et al.</i> , 2020; Lezoche <i>et al.</i> , 2020.

Fuente: elaboración propia a partir de Maffezzoli *et al.* (2022).

El manejo inteligente del agua dulce para riego es crucial para el aumento del rendimiento de los cultivos y para la contribución a la sostenibilidad ambiental, debido a que permite determinar la cantidad exacta de agua que necesitan las plantas (Kamienski *et al.*, 2019). Diversos autores han estudiado el uso de sensores y el Internet de las cosas al servicio del uso más eficiente del agua de riego (García *et al.*, 2020), en el diseño de modelos que permiten la planeación, programación, ejecución y control del riego (Monteleone *et al.*, 2020), y el diseño, construcción y validación de sistemas de riego subterráneo controlado, basado en sensores (Jabro *et al.*, 2020; Mohammed *et al.*, 2021). Lu *et al.* (2022) presentan las tecnologías GPS, sensores remotos y sensores inalámbricos utilizados en sistemas de recolección de información, que permiten la aplicación de agua y fertilizantes que requieren los cultivos.

Además del manejo del agua, la agricultura de precisión permite obtener cultivos más sanos, en el momento preciso, y más eficientes, que estén disponibles para la alimentación de la población mediante el monitoreo a través de tecnologías como los vehículos aéreos no tripulados, e imágenes aéreas con sistemas de información geográfica (Hassan *et al.*, 2022). Destaca el uso de sensores flexibles y biosensores con nanomateriales, que permiten predecir la morfología y fisiología del órgano vegetal en el cual se han instalado, para permitir la información del desarrollo a través del tratamiento personalizado que mejora la salud general de las plantas, con el fin de aumentar el rendimiento de los cultivos de una manera más sostenible (Barnes *et al.*, 2019; Kim; Lee, 2022; Lo Presti *et al.*, 2023).

La variabilidad de las condiciones del clima influencia ampliamente los principales procesos agrícolas (Gaitán, 2020), por lo que el seguimiento a las condiciones climáticas en tiempo real y las características del cultivo permitirá la toma de decisiones de manera eficiente (Maffezzoli *et al.*, 2022). Si bien, se han usado los datos satelitales para la predicción climática, la información recolectada a partir de imágenes captadas con cámaras térmicas ubicadas en vehículos aéreos no tripulados ha permitido el análisis de datos relacionados con la temperatura (infrarrojo térmico) y tasas de evapotranspiración en tiempo real (Brenner *et al.*, 2018).

Durante el periodo de crecimiento del cultivo, el diseño y uso de un sistema de inteligencia artificial no únicamente reduce el riesgo de enfermedades en las plantas de cultivo, sino que también disminuye el impacto ambiental (Sharma *et al.*, 2021; Heitkämper *et al.*, 2023). El Internet de las cosas y el uso de vehículos aéreos no tripulados permitieron el monitoreo de la incidencia de plagas y enfermedades en conjunción con parámetros climáticos; sin embargo, sigue siendo un desafío importante para los agricultores (Gao *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2022).

Uno de los aspectos en los cuales la tecnología tiene un papel preponderante es el monitoreo del suelo. Siempre se debe tener en cuenta que la base de cualquier tecnología de cultivo es la información adecuada del suelo, de lo contrario, los tratamientos o actividades no presentaran los resultados esperados (Mizik,

2023). Determinar su estado antes del establecimiento del cultivo ayuda a los productores a obtener mejores rendimientos, especialmente lo que tiene que ver con la disponibilidad de nutrientes, para tener en cuenta la topografía del terreno, el contenido de arcilla, arena, limos y materia orgánica, el pH y la permeabilidad (Sharma *et al.*, 2021; Postolache *et al.*, 2022; Kim; Lee, 2022).

Además de los populares drones usados en la agricultura, actualmente se implementa el uso de robots, los cuales pueden realizar tareas en la cosecha de frutas, el control de plagas y enfermedades, y el manejo del cultivo en general. Estos incluyen abejas robots y “sistemas de robots blandos”, los cuales permiten disminuir el riesgo de magulladuras superficiales en frutas (Kondoyanni *et al.*, 2022).

Uno de los sectores que permite mayores aplicaciones y beneficios de las tecnologías de agricultura de precisión es el cultivo bajo condiciones protegidas en invernadero e indoor. Debido a los avances en recolección, almacenamiento y análisis de gran cantidad de datos, estas empresas agrícolas pueden optimizar los recursos como materias primas, material vegetal y el recurso humano (Escamilla-García *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022), y el uso más eficiente de los nutrientes en solución mediante el uso de sensores y *machine learning* (Wang *et al.*, 2018). Asimismo, la acuaponía aplicada, especialmente a las piscifactorías, ha implementado sistemas basados en Internet de las cosas (IoT), que permite el monitoreo a través de sensores que recolectan información relacionada con parámetros del agua, suelo y calidad del aire, que luego es recolectada y analizada a un computador (Alselek *et al.*, 2022).

Las soluciones desde el Internet de las cosas y big data permiten el procesamiento de datos en tiempo real en términos de comportamiento y rendimiento a través de redes complejas vinculadas eficientemente dentro de la cadena de suministro para la optimización de procesos de rendimiento agrícola (Navarro *et al.*, 2020; Lezoche *et al.*, 2020).

## 4. Tecnologías aplicadas en agricultura 4.0

La agricultura 4.0 comprende diferentes tecnologías ya operativas o en desarrollo, como la robótica, nanotecnología, proteína sintética, agricultura celular, tecnología de edición de genes, inteligencia artificial, cadenas de bloques (*blockchain*) y aprendizaje autónomo (*machine learning*) (Klerkx; Rose, 2020). Dentro de las tecnologías más usadas en agricultura 4.0, se han identificado: IoT, analítica de datos y *big data*, inteligencia artificial (IA) y *machine learning* (ML), computación en la nube y sistemas ciberfísicos (CPS), procesamiento de imágenes, sistemas de información geográfica (GIS), robótica y automatización, drones, tecnologías de la comunicación, *blockchain*, realidad aumentada y realidad virtual (AR y VR) (Maffezzoli *et al.*, 2022). Las anteriores abreviaturas, por sus siglas en inglés) (Tabla 2). A continuación, se describen algunas tecnologías aplicadas al sector agrícola, las cuales han sido recopiladas de los artículos revisados.

**Tabla 2.** Tecnologías usadas en agricultura 4.0.

Dominios de aplicación	Descripción	Referencias
Internet de las cosas	Sistema de dispositivos informáticos interrelacionados y máquinas digitales que cuentan con la capacidad de transferir datos a través de una red, sin necesidad de interacción persona a persona o persona a computadora.	Goap <i>et al.</i> , 2018; Monteleone <i>et al.</i> , 2020; Araújo <i>et al.</i> , 2021; Angelopoulos <i>et al.</i> , 2020; Maffezzoli <i>et al.</i> , 2022; Adow <i>et al.</i> , 2022.
Analítica de datos y big data	Recopilación y análisis de una gran cantidad y variedad de datos, que usa técnicas para filtrar, capturar e informar a gran velocidad.	Bertoglio <i>et al.</i> , 2021.
Inteligencia artificial y aprendizaje autónomo (machine learning)	Ofrecen algoritmos formales para la precisión de la predicción y la evaluación del rendimiento, así como la clasificación de patrones que pueden resolver problemas de conocimiento.	Indu <i>et al.</i> , 2022; Sharma <i>et al.</i> , 2021; Helfer <i>et al.</i> , 2020.
Computación en la nube y sistema ciberfísico (CPS)	Esta plataforma de software remoto proporciona gestión de seguimiento y control. Esta tecnología se puede ampliar bajo demanda, porque los datos se almacenan y calculan en servidores virtuales. El CPS monitorea los activos físicos, creando copias virtuales de los mismos.	Shi <i>et al.</i> , 2019; van Hilten; Wolfert, 2022.
Procesamiento de imágenes	Análisis de datos de entrada que capturan las imágenes durante las operaciones.	AlZu'bi <i>et al.</i> , 2019; Morales <i>et al.</i> , 2023; Jihani <i>et al.</i> , 2023.
Sistemas de información geográfica (GIS) y análisis	Este conjunto de tecnologías incluye el sistema de posicionamiento geográfico (GPS), GIS, teledetección y geomapeo. GIS es un sistema informático que es capaz asociar datos con sus posiciones geográficas y procesarlos para extraer información.	Krug <i>et al.</i> , 2022; Santos <i>et al.</i> , 2022.
Robótica y automatización	Máquinas que automatizan procesos para descargar trabajo humano físico y aumentar la productividad y la calidad del producto.	Bouguettaya <i>et al.</i> , 2022; Niu <i>et al.</i> , 2020.
Drones y vehículos aéreos no tripulados	Aeronaves que pueden volar automáticamente gracias a sensores y GPS.	Bouguettaya <i>et al.</i> , 2022; Singh <i>et al.</i> , 2022.

Dominios de aplicación	Descripción	Referencias
Tecnologías de comunicación	Vías a través de las cuales se pueden intercambiar datos. En particular, 5G proporciona banda ancha mejorada y comunicación masiva tipo máquina.	Van Hilten; Wolfert, 2022.
Cadena de bloques (blockchain)	Se enfoca en servicios, como libros de contabilidad públicos y bases de datos distribuidas en tiempo real, y ofrece marcas de tiempo de bloques mantenidos por cada nodo participante.	Bodkhe <i>et al.</i> , 2020; Adow <i>et al.</i> , 2022; Tyagi <i>et al.</i> , 2023.
Realidad aumentada y realidad virtual	La realidad virtual enfatiza la inmersión en el mundo virtual, mientras que la realidad aumentada enfatiza en la capacidad de incorporar información virtual en escenarios del mundo real.	

Fuente: elaboración propia a partir de Maffezzoli *et al.* (2022).

Una de las principales tecnologías aplicadas en la agricultura 4.0 es el Internet de las cosas (IoT), pues se considera que está cerrando brechas entre el mundo cibernético y el físico; está basada en la adquisición de datos a partir de sensores, drones y dispositivos de sensoramiento in situ, los cuales hacen posible correlacionar multitud de parámetros que ayudan a ampliar el conocimiento acerca de la dinámica de crecimiento del cultivo (Mazon-Olivo *et al.*, 2018; Monteleone *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021; Maffezzoli *et al.*, 2022). Los algoritmos usados en IoT predicen los requisitos de riego de un campo utilizando detección de humedad del suelo, temperatura del suelo, condiciones ambientales y datos de pronóstico del tiempo climático (precipitación, temperatura del aire, humedad relativa rayos UV) (Goap *et al.*, 2018; Angelopoulos *et al.*, 2020; Adow *et al.*, 2022). Asimismo, en cultivos verticales multipónicos (MVF, por sus siglas en inglés), se desarrolla un nuevo concepto en agricultura vertical urbana (Chen *et al.*, 2022). Las cantidades masivas de datos provenientes de dispositivos de Internet de las cosas y otras tecnologías de detección generalmente se denominan *big data* (Bertoglio *et al.*, 2021).

Otra tecnología usada es la computación en la nube. Este concepto es importante en agricultura, por la operatividad con el Internet de las cosas (IoT), ya que no solamente es una tecnología, sino que integra muchas otras (Maffezzoli *et al.*, 2022). Es un sistema informático basado en Internet, que proporciona hardware, software, servicios de plataforma para almacenamiento de diversas aplicaciones, textos, imágenes y videos de información agrícola (Shi *et al.*, 2019). Los sistemas ciberfísicos (CPS, por sus siglas en inglés) son computadoras y redes integradas que monitorean y controlan procesos físicos mientras brindan datos para cálculos y análisis en las fases de monitoreo, donde usan sensores que obtienen datos sobre el cultivo o la salud animal, y en el análisis y planificación de las actividades agrícolas. El prerrequisito tecnológico para facilitar esta transformación es la transferencia de datos en tiempo real a partir de sensores de suelo, agua o clima, que respalden la toma de decisiones para el agricultor (van Hilten; Wolfert, 2022), lo que significa, de manera imperativa, un intercambio de datos rápido, confiable y seguro entre sensores y dispositivos IoT necesarios en agricultura inteligente.

Inteligencia artificial y algoritmos de *machine learning* (ML) son tecnologías que emergen para el análisis de gran cantidad de datos aplicados al sector agrícola (Sharma *et al.*, 2021). La construcción de modelos basados en IA, por ejemplo, redes neuronales artificiales, redes neuronales convolucionales y aprendizaje por refuerzo, son tareas muy exigentes, pero las estimaciones paramétricas son útiles para resolver problemas con visión de



futuro (Chen *et al.*, 2022; Maffezzoli *et al.*, 2022). ML ha sido usado en el control de las repeticiones de aplicación de pesticidas en la agricultura (Indu *et al.*, 2022), fertilidad y productividad del suelo (Helfer *et al.*, 2020).

El procesamiento de imágenes es actualmente un área de interés en agricultura, especialmente la perspectiva del uso de Internet de las cosas multimedia (IoT) con el empleo de sensores que permiten la generación de imágenes para la implementación de riego (AlZu'bi *et al.*, 2019), el uso de sensores remotos y redes neuronales convolucionales en el mejoramiento de la producción (Filintas *et al.*, 2022; Morales *et al.*, 2023). La detección ubicua habilitada mediante sensores inalámbricos (WSN) ha sido adoptada en agricultura de precisión, en la determinación de las necesidades del suelo en términos de agua, mediante el monitoreo de parámetros ambientales (Jihani *et al.*, 2023), en donde los sensores actuadores se combinan a la perfección con el entorno que los rodea, y la información se comparte entre plataformas a través del Internet de las cosas (Bayih *et al.*, 2022).

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten obtener y procesar gran cantidad de imágenes y datos de posición geográfica en campo, lo que posibilita el monitoreo de actividades agrícolas. Estas dos tecnologías están directamente integradas con drones, dispositivos, cámaras y software, que permiten, entre otros, determinar procesos erosivos de suelos, y el cálculo de biomasa vegetal mediante el índice de vegetación normalizado (NDVI) (Krug *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022; Filintas *et al.*, 2022).

Aplicados de manera interesante a la agricultura de precisión, se encuentran los drones y otros vehículos aéreos no tripulados (Singh *et al.*, 2022). Kovalev *et al.* (2022) los utilizaron en la construcción de un modelo para definir la eficiencia en el tiempo para la aplicación de fertilizantes y pesticidas. Bouguettaya *et al.* (2022) analizaron el uso de técnicas de sistemas visuales inteligentes, basadas en algoritmos de *deep learning*, y las tecnologías de los vehículos aéreos no tripulados para la identificación y el tratamiento de enfermedades en los cultivos, y la estimación de la evapotranspiración (Niu *et al.*, 2020). Mediante la utilización de drones equipados con cámaras multiespectrales y un software, se generaron mapas calibrados de condiciones de cultivo de arroz (Montilla *et al.*, 2021). Actualmente, con el advenimiento de la cuarta revolución industrial, la integración del Internet de las cosas y los sistemas robóticos conduce al concepto de Internet de las cosas robóticas, que se caracteriza por la autonomía de decisión, percepción y manipulación, aplicada al sector agrícola, especialmente en labores de cosecha (Romeo *et al.*, 2020).

En la finca, los productores agrícolas utilizan cada vez más los datos en tiempo real, aplicados a las actividades agrícolas, pecuarias, y contextos de suelo y agua, que les permiten una mejor toma de decisiones. En este momento, la aplicación de la 5G en la agricultura se encuentra en una etapa temprana, se espera que esta conectividad permita mayores aplicaciones de la IoT en la agricultura, mayor velocidad, volumen y potencial en el procesamiento computacional, y mejor control en la calidad de los productos y la reducción de residuos en granjas totalmente autónomas (van Hilten; Wolfert, 2022).

*Blockchain* es una serie de registros llamados bloques, que están vinculados entre sí de forma segura (Bodkhe *et al.*, 2020; Adow *et al.*, 2022; Tyagi *et al.*, 2023). Adow *et al.* (2022) proponen un modelo de IoT basado en *blockchain*, el cual mejora la transparencia y calidad de la cadena de suministro, por lo que los agricultores pueden participar de manera eficiente en el monitoreo de los cultivos y el entorno agrícola mediante contratos inteligentes para organizar todas las transacciones en redes de suministros descentralizadas, donde los clientes pueden verificar la legitimidad de un artículo mediante el uso del sistema. De las tecnologías revisadas, por ejemplo, los monitores que registran información del rendimiento del cultivo a medida que cosechan, y cruzan esta información con la del suelo, de tal manera que el agricultor decide el momento y el lugar correcto para la aplicación de semillas, fertilizantes y pesticidas, surge la pregunta: ¿estas preferencias de tecnologías mejoran las condiciones de trabajo en relación con el bienestar del agricultor, y para el ambiente? (Nowak, 2021).

## 5. Contexto general sobre la adopción de agricultura 4.0 a pequeña escala

En muchos países como Colombia, los agricultores usan las formas tradicionales de agricultura con base en su experiencia y, en la mayoría de los casos, su trabajo queda a merced de las condiciones climáticas. La agricultura moderna, empoderada por el Internet de las cosas y la inteligencia artificial, permite disminuir la aleatoriedad, con el fin de optimizar cada uno de los pasos en el proceso agrícola. Sin embargo, es necesario prestar atención a los efectos de inclusión y exclusión de las tecnologías innovadoras de agricultura 4.0, de manera responsable anticipándose a los impactos potenciales a través de procesos reflexivos y receptivos, y no seguir siendo espectadores pasivos en esta revolución agrícola (Klerkx; Rose, 2020).

En el proceso de transformación de granjas a empresas inteligentes, existen factores que deben ser analizados a la hora de adoptar una u otra tecnología, especialmente los aspectos de tipo:

- 1. Tecnológico:** tecnología a aplicar y el modelo específico usado (Mühl; de Oliveira, 2022; Mizik, 2023). El sitio agrícola donde se recolectan los datos y su representatividad en el todo, la transformación de los datos en información que apoye a los usuarios en la toma de decisiones, la adquisición de software y la disponibilidad de plataformas que recopilen datos en tiempo real (Maffezzoli *et al.*, 2022), disponibilidad de tecnologías de comunicación y soporte técnico (Barnes *et al.*, 2019).
- 2. Agrícola:** tipo de cultivo y condiciones específicas, clima, tipo de suelo y cantidad destinada al cultivo, tenencia de la tierra, características de la región, determinación de zonas geográficas homogéneas, de manera que la aplicación de insumos y la toma de decisiones puedan ser tratadas para cada zona o región (Nowak, 2021).
- 3. Factor económico:** rentabilidad o tasa de retorno, costos (Barnes *et al.*, 2019).
- 4. Políticas regionales y nacionales:** con respecto a energía eléctrica y acceso a Internet (Mizik, 2023).
- 5. Social:** voluntad de los agricultores de confiar en la tecnología, el nivel de capacitación en las tecnologías, educación y habilidades de los agricultores, edad, mano de obra empleada y capacidades operativas (Barnes *et al.*, 2019).
- 6. Ambiental:** el cambio climático puede afectar la temperatura, la humedad del suelo, y la tasa de fotosíntesis, lo que puede influir en el rendimiento del cultivo (Chen *et al.*, 2022).

La principal barrera en la adopción de tecnologías de agricultura de precisión es el alto costo de entrada, especialmente para los pequeños productores, que no cuentan con incentivos para la implementación de procesos de innovación agrícola (Barnes *et al.*, 2019), que requiere de una mayor inversión en el aprendizaje, debido a la adquisición de dispositivos electrónicos móviles, sensores y software, necesarios en el manejo y comprensión de la información. Además, es necesaria su correcta utilización, de tal manera que se mantenga la eficiencia en el área de cultivo, lo que podría generar una brecha entre la tecnología, la capacidad del usuario para operar la maquinaria y la decisión de compra, lo que puede exacerbar la inequidad social (Klerkx; Rose, 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, varios autores han planteado estrategias que permitan la adopción de sistemas de innovación en agricultura. Mizik (2023) plantea soluciones que permitan la adopción de tecnologías, especialmente diseñadas para pequeños productores, así: ejecución de actividades conjuntas, en colectivos, gremios y cooperativas; delimitación de zonas de cultivo; tecnologías de bajo costo, simples y fácil de usar; el uso de maquinaria en comunidad; capacitaciones, apoyo profesional de proveedores, tutores y profesionales del agro; y el establecimiento de políticas de inversión y regulación adecuadas. Kamienski *et al.* (2019) proponen la disponibilidad de dispositivos asequibles o de bajo costo, tecnologías inalámbricas de

bajo consumo, disponibilidad de centro de datos en la nube para el almacenamiento y procesamiento, marcos de gestión para tratar datos no estructurados de redes sociales, recursos informáticos de alto rendimiento en plataformas, algoritmos de inteligencia computacional para el manejo de volúmenes de datos, estabilidad de la conexión a Internet en la finca, y mecanismos automatizados para el despliegue del sistema. Lo anterior permitirá disminuir la brecha significativa en la adquisición de tecnología de los pequeños agricultores con respecto a barreras sociales, económicas, tecnológicas y de infraestructura (Bayih *et al.*, 2022). Sin embargo, no hay duda de que cualquier innovación en la agricultura es bienvenida, especialmente para hacer que la agricultura sea más sostenible ambientalmente en la lucha contra el cambio climático, y lograr un uso eficiente del agua, los fertilizantes y los combustibles fósiles (Kim; Lee, 2022; Mühl; de Oliveira, 2022).

## 6. Conclusiones

La información organizada en este documento ayuda a entender, de manera general, el concepto de agricultura 4.0, así como las tecnologías más aplicadas en sistemas agrícolas, tanto en condiciones de campo como en agricultura protegida, como el Internet de las cosas, la analítica de datos, inteligencia artificial, *machine learning*, computación en la nube, sensores remotos, que han sido identificadas como las de mayor uso e impacto en la agricultura a nivel del recurso agua, el manejo de cultivos, la precisión climática, el manejo de agroquímicos, el monitoreo del suelo, y cultivos en invernadero, entre otros. Varias tecnologías usadas en agricultura 4.0 se han documentado en procesos de cultivo con diferentes enfoques, lo cual permite inferir que es bastante amplia, compleja, y está en constante evolución, que va de la mano del rápido progreso tecnológico que nos permea ya en la agricultura 5.0.

Pasar de la mera revisión del uso de las tecnologías aplicadas en el sector agrícola a pensar en una ejecución exitosa en condiciones regionales requiere no solamente una evaluación de los insumos tecnológicos necesarios y las condiciones biofísicas, sino también la gestión adecuada de recursos como la conectividad a Internet, el recurso humano capacitado dispuesto a su implementación, y los costos de los dispositivos, entre otros. La gran cantidad de información científica sobre este tema seguramente permitió que otras tecnologías no fueran mencionadas, lo que de ninguna manera les resta importancia de uso.

En este punto se abre el abanico de oportunidades para seguir rastreando innovaciones asociadas a la revolución tecnológica, apropiadas por región, agricultores y comunidades, que permita una agricultura sostenible.

## Referencias

- Adel, Amr (2022). Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 40.  
<https://doi.org/10.1186/s13677-022-00314-5>
- Adow, Anass; Shrivasa, Mahendra; Mahdi, Hussain; Zahra, Musaddak; Verma, Devvret; Doohan, Nitika; Jalali, Asadullah (2022). Analysis of Agriculture and Food Supply Chain through Blockchain and IoT with Light Weight Cluster Head. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022, 1296993.  
<https://doi.org/10.1155/2022/1296993>
- Alselek, Mohammad; Alcaraz-Calero, Jose; Segura-Garcia, Jaume; Wang, Qi (2022). Water IoT Monitoring System for Aquaponics Health and Fishery Applications. *Sensors*, 22(19), 7679.  
<https://doi.org/10.3390/s22197679>

- AlZu'bi, Shadi; Hawashin, Bilal; Mujahed, Muhannad; Jaraweh, Yaser; Gupta, Brij (2019). An efficient employment of internet of multimedia things in smart and future agriculture. *Multimedia Tools and Applications*, 78, 29581-29605.  
<https://doi.org/10.1007/s11042-019-7367-0>
- Angelopoulos, Constantinos; Filios, Gabriel; Nikolettseas, Sotiris; Raptis, Theofanis (2020). Keeping data at the edge of smart irrigation networks: A case study in strawberry greenhouses. *Computer Networks*, 167, 107039.  
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107039>
- Araújo, Sara; Peres, Ricardo; Barata, José; Lidon, Fernando; Ramalho, José (2021) Characterising the Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges and Opportunities. *Agronomy*, 11(4), 667.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>
- Barnes, Andrew; Soto, Iria; Eory, Vera; Beck, Bert; Balafoutis, Athanasios; Sánchez, Berta; Vangeyte, Jürgen; Fountas, Spyros; van der Wal, Tamme; Gómez-Barbero, Manuel (2019). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, 80, 163-174.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>
- Bayih, Amsale; Morales, Javier; Assabie, Yaregal; de By, Rolf (2022). Utilization of Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Sustainable Smallholder Agriculture. *Sensors*, 22(9), 3273.  
<https://doi.org/10.3390/s22093273>
- Bentivoglio, Deborah; Bucci Giorgia; Belletti Matteo; Finco, Adele (2022). A theoretical framework on network's dynamics for precision agriculture technologies adoption. *Revista de Economía e Sociología Rural*, 60(4), e245721.  
<https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.245721>
- Bertoglio, Riccardo; Corbo, Chiara; Renga, Filippo; Matteucci, Matteo (2021). The digital agricultural revolution: a bibliometric analysis literature review. *IEEE Access*, 9, 134762-134782.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115258>
- Bodkhe, Umesh; Tanwar, Sudeep; Parekh, Karan; Khanpara, Pimal; Tyagi, Sudhanshu; Kumar, Neeraj; Alazab, Mamoun (2020). Blockchain for Industry 4.0: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, 8, 79764-79800.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988579>
- Bouguettaya, Abdelmalek; Zarzour, Hafed; Kechida, Ahmed; Taberkit, Amine (2022). A survey on deep learning-based identification of plant and crop diseases from UAV-based aerial images. *Cluster Computing*, 26, 1297-1317.  
<https://doi.org/10.1007/s10586-022-03627-x>
- Brenner, Claire; Zeeman, Matthias; Bernhardt, Matthias; Schulz, Karsten (2018). Estimation of evapotranspiration of temperate grassland based on high-resolution thermal and visible range imagery from unmanned aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5141-5174.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1471550>
- Campos, Jean; Manrique-Silupú, José; Dorneanu, Bogdan; Ipanaqué, William; Arellano-García, Harvey (2022). A smart decision framework for the prediction of thrips incidence in organic banana crops. *Ecological Modelling*, 473, 110147.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110147>

- Chen, Qianyu; Li, Lanyu; Chong, Clive; Wang, Xionan (2022). AI-enhanced soil management and smart farming. *Soil Use and Management*, 38, 7-13.  
<https://doi.org/10.1111/sum.12771>
- Escamilla-García, Axel; Soto-Zarazúa, Gemaro; Toledano-Ayala, Manuel; Rivas-Araiza, Edgar; Gastélum-Barrios, Abraham (2020). Applications of Artificial Neural Networks in Greenhouse Technology and Overview for Smart Agriculture Development. *Applied Sciences*, 10(11), 3835.  
<https://doi.org/10.3390/app10113835>
- Filintas, Agathos; Nteskou, Aikaterini; Kourgialas, Nektarios; Gougoulas, Nikolaos; Hatzichristou, Eleni (2022). A Comparison between Variable Deficit Irrigation and Farmers' Irrigation Practices under Three Fertilization Levels in Cotton Yield (*Gossypium hirsutum* L.) Using Precision Agriculture, Remote Sensing, Soil Analyses, and Crop Growth Modeling. *Water*, 14(17), 2654.  
<https://doi.org/10.3390/w14172654>
- Gao, Demin; Sun, Quan; Hu, Bin; Zhang, Shuo (2020). A Framework for Agricultural Pest and Disease Monitoring Based on Internet-of-Things and Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 20(5), 1487.  
<https://doi.org/10.3390/s20051487>
- Gaitán, Carlos (2020). Chapter 7: Machine learning applications for agricultural impacts under extreme events. En J. Sillmann; S. Sippel; S. Russo (Eds.), *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment* (pp.119-138). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814895-2.00007-0>
- García, Laura; Parra, Lorena; Jiménez, José; Lloret, Jaime; Lorenz, Pascal (2020). IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042.  
<https://doi.org/10.3390/s20041042>
- Goap, Amarendra; Sharma, Deepak; Shukla, Awdhesh; Ramakrishna, Challa (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 41-49.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>
- Grabowska, Sandra; Saniuk, Sebastian; Gajdzik, Bożena (2022). Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. *Scientometrics*, 127(6), 3117-3144.  
<https://doi.org/10.1007/s11192-022-04370-1>
- Hassan, Syeda; Alam, Muhammad; Zia, Muhammad; Rashid, Muhammad; Illahi, Usman; Su'ud, Mazilham (2022). Rice Crop Counting Using Aerial Imagery and GIS for the Assessment of Soil Health to Increase Crop Yield. *Sensors*, 22(21), 8567.  
<https://doi.org/10.3390/s22218567>
- Heitkämper, Katja; Reissig, Linda; Bravin, Esther; Glück, Saskia; Mann, Stefan (2023). Digital technology adoption for plant protection: Assembling the environmental, labour, economic and social pieces of the puzzle. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100148.  
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100148>
- Helfer, Gilson; Victória, Jorge; dos Santos, Ronaldo; da Costa, Adilson (2020). A computational model for soil fertility prediction in ubiquitous agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105602.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105602>

- Indu, Malik; Baghel, Anurag; Bhardwaj, Arpit; Ibrahim, Wubshet (2022). Optimization of Pesticides Spray on Crops in Agriculture using Machine Learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 9408535. <https://doi.org/10.1155/2022/9408535>
- Jabro, Jay; Stevens, Bart; Iversen, William; Allen, Brett; Sainju, Upendra (2020). Irrigation Scheduling Based on Wireless Sensors Output and Soil-Water Characteristic Curve in Two Soils. *Sensors*, 20(5), 1336. <https://doi.org/10.3390/s20051336>
- Jihani, Nassima; Kabbaj, Mohammed; Benbrahim, Mohammed (2023). Sensor fault detection and isolation for smart irrigation wireless sensor network based on parity space. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(2), 1643-1471. <http://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1463-1471>
- Kamienski, Carlos; Soininen, Juha-Pekka; Taumberger, Markus; Dantas, Ramide; Toscano, Attilio; Cinotti, Tullio; Maia, Rodrigo; Torre, André (2019). Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture. *Sensors*, 19(2), 276. <https://doi.org/10.3390/s19020276>
- Kim, Ming-Yeong; Lee, Kyu (2022). Electrochemical Sensors for Sustainable Precision Agriculture-A Review. *Frontiers in Chemistry*, 10, 848320. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.848320>
- Klerkx, Laurens; Jakku, Emma; Labarthe, Pierre (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 Science*, 90-91(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Klerkx, Laurens; Rose, David (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>
- Kondoyanni, Maria; Loukatos, Dimitrios; Maraveas, Chrysanthos; Drosos, Christos; Arvanitis, Konstantinos (2022). Bio-Inspired Robots and Structures toward Fostering the Modernization of Agriculture. *Biomimetics*, 7(2), 69. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020069>
- Kovalev, Igor; Kovalev, Dmitry; Voroshilova, Anna; Podoplelova, Valerya; Borovinsky, Dmitry (2022). GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture. *Earth and Environmental Science*, 1076(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>
- Krug, Evelin; Gomes, Glaucio; de Souza, Eduardo; Gebler, Luciano; Sobjak, Ricardo; Bazzi, Claudio (2022). Estimating soil loss by laminar erosion using precision agriculture computational tools. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26(12), 907-914. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p907-914>
- Lezoche, Mario; Hernández, Jorge; Díaz, María; Panetto, Hervé; Kacprzyk, Janusz (2020). Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in Industry*, 117, 103187.

- Lo Presti, Daniela; Di Tocco, Joshua; Massaroni, Carlo; Cimini, Sara; de Gara, Laura; Singh, Sima; Raucci, Ada; Manganiello, Gelsomina; Woo, Sheridan; Schena, Emiliano; Cinti, Stefano (2023). Current understanding, challenges and perspective on portable systems applied to plant monitoring and precision agriculture. *Biosensors & Bioelectronics*, 222, 115005.  
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.115005>
- Lu, Yue; Liu, Mingzheng; Li, Changhe; Liu, Xiaochu; Cao, Chengmao; Li, Xinping; Kan, Za (2022). Precision Fertilization and Irrigation: Progress and Applications. *AgriEngineering*, 4(3), 626-655.  
<https://doi.org/10.3390/agriengineering4030041>
- Maffezzoli, Federico; Ardolino, Marco; Bacchetti, Andrea; Perona, Marco; Renga, Filippo (2022). Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits. *Futures*, 142, 102998.  
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102998>
- Mazon-Olivo, Bertha; Hernández-Rojas, Dixys; Maza-Salinas, José; Pan, Alberto (2018). Rules engine and complex event processor in the context of internet of things for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 347-360.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.013>
- Mesías-Ruiz, Gustavo; Pérez-Ortiz, María; Dorado, José; de Castro, Ana; Peña, José (2023). Boosting precision crop protection towards agriculture 5.0 via machine learning and emerging technologies: A contextual review. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1143326.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143326>
- Mizik, Tamás (2023) How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review. *Precision Agriculture*, 24, 384-406.  
<https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>
- Mohammed, Maged; Riad, Khaled; Alqahtani, Nashi (2021). Efficient IoT-Based Control for a Smart Subsurface Irrigation System to Enhance Irrigation Management of Date Palm. *Sensors*, 21(12), 3942.  
<https://doi.org/10.3390/s21123942>
- Monteleone, Sergio; de Moraes, Edmilson; Tondato, Brenno; Aquino, Plinio; Maia, Rodrigo; Neto, André; Toscano, Attilio (2020). Exploring the Adoption of Precision Agriculture for Irrigation in the Context of Agriculture 4.0: The Key Role of Internet of Things. *Sensors*, 20(24), 7091.  
<https://doi.org/10.3390/s20247091>
- Montilla, Guillermo; Montilla, Ricardo; Pérez, Egilda; Frassato, Luigi; Seijas, César (2021). Precision agriculture for rice crops with an emphasis in low health index areas. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(1), 9373-9381.  
<https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.85310>
- Morales, Giorgio; Sheppard, John; Hegedus, Paul; Maxwell, Bruce (2023). Improved Yield Prediction of Winter Wheat Using a Novel Two-Dimensional Deep Regression Neural Network Trained via Remote Sensing. *Sensors*, 23(1), 489.  
<https://doi.org/10.3390/s23010489>
- Mühl, Diego; de Oliveira, Leticia (2022). A bibliometric and thematic approach to agriculture 4.0. *Heliyon*, 8(5), e09369.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09369>

- Navarro, Emerson; Costa, Nuno; Pereira, António (2020). A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming. *Sensors*, 20(15), 4231.  
<https://doi.org/10.3390/s20154231>
- Niu, Haoyu; Hollenbeck, Derek; Zhao, Tiebiao; Wang, Dong; Chen, YangQuan (2020). Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(22), 6427.  
<https://doi.org/10.3390/s20226427>
- Nowak, Benjamin (2021). Precision Agriculture: Where do We Stand? A Review of the Adoption of Precision Agriculture Technologies on Field Crops Farms in Developed Countries. *Agricultural Research*, 10(4), 515-522.  
<https://doi.org/10.1007/s40003-021-00539-x>
- Postolache, Stefan; Sebastião, Pedro; Viegas, Vitor; Postolache, Octavian; Cercas, Francisco (2022). IoT-Based Systems for Soil Nutrients Assessment in Horticulture. *Sensors*, 23(1), 403.  
<https://doi.org/10.3390/s23010403>
- Rocha-Jácome, Cristian; González, Ramón; Muñoz, Fernando; Guevara-Cabezas, Esteban; Hidalgo, Eduardo (2021). Industry 4.0: A Proposal of Paradigm Organization Schemes from a Systematic Literature Review. *Sensors*, 22(1), 66.  
<https://doi.org/10.3390/s22010066>
- Romeo, Laura; Petitti, Antonio; Marani, Roberto; Milella, Annalisa (2020). Internet of Robotic Things in Smart Domains: Applications and Challenges. *Sensors*, 20(12), 3355.  
<https://doi.org/10.3390/s20123355>
- Rose, David; Chilvers, Jason (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87.  
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>
- Santos, Márcio; Gebler, Luciano; Sebem, Elódio (2022). Correlation between vegetation indexes generated at Vitis Vinifera L. and soil, plant and production parameters for emergency application in decision making. *Ciência Rural*, 52(2).  
<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20201037>
- Sharma, Abhinav; Jain, Arpit; Gupta, Prateek; Chowdary, Vinay (2021). Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, 9, 4843-4873.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048415>
- Shi, Xiaojie; An, Xingshuan; Zhao, Qingxue; Liu, Huimin; Xia, Lianming; Sun, Xia; Guo, Yemin (2019). State-of-the-Art Internet of Things in Protected Agriculture. *Sensors*, 19(8), 1833.  
<https://doi.org/10.3390/s19081833>
- Singh, Abhaya; Yerudkar, Amol; Mariani, Valerio; Iannelli, Luigi; Glielmo, Luigi (2022). A Bibliometric Review of the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture and Precision Viticulture for Sensing Applications. *Remote Sensing*, 14(7), 1604.  
<https://doi.org/10.3390/rs14071604>
- Sociedad Internacional para Agricultura de Precisión (2021). *Precision Agriculture Definition*.  
<https://ispag.org/about/definition>



- Tyagi, Amit; Dananjayan, Sathian; Agarwal, Deepshikha; Ahmed, Hasmath (2023). Blockchain-Internet of Things Applications: Opportunities and Challenges for Industry 4.0 and Society 5.0. *Sensors*, 23(2), 947. <https://doi.org/10.3390/s23020947>
- Van Hilten, Mireille; Wolfert, Sjaak (2022). 5G in agri-food - A review on current status, opportunities and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201,107291. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107291>
- Wang, Xiogang; Hu, Wenjin; Li, Kaishu; Song, Lepeng; Song, Luqing (2018). Modeling of Soft Sensor Based on DBN-ELM and Its Application in Measurement of Nutrient Solution Composition for Soilless Culture. En *IEEE International Conference of Safety Produce Informatization* (pp. 93-97). <https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690373>
- Zambon, Ilaria; Cecchini, Massimo; Egidi, Gianluca; Saporito, Maria; Colantoni, Andrea (2019). Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes*, 7(1), 36. <https://doi.org/10.3390/pr7010036>
- Zhai, Zhaoyu; Martínez, José; Beltran, Victoria; Martínez, Néstor (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>