

NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS AL SECTOR AGRÍCOLA PARA LA REDUCCIÓN
DE PELIGROS A LA SALUD Y AL MEDIOAMBIENTE ASOCIADOS CON PLAGUICIDAS



SEBASTIAN CIFUENTES MANYOMA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2025

NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS AL SECTOR AGRÍCOLA PARA LA REDUCCIÓN
DE PELIGROS A LA SALUD Y AL MEDIOAMBIENTE ASOCIADOS CON PLAGUICIDAS

SEBASTIAN CIFUENTES MANYOMA

Estado del arte presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Ambiental

Director

Doc. JONATHAN STEVEN MURCIA FANDIÑO

Doctorando en ingeniería ambiental, química y de materiales

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2025

Autoridades académicas

P. Álvaro José Arango Restrepo, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio Cortés Gallego, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio García Peñaranda, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea Sierra Tobón

Secretaria de División Seccional Villavicencio

Mg. William Peñaranda Zárate

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Dedicatoria

A Dios

Al creador de todas las cosas, que siempre estás presente, iluminando mi camino con tu luz divina y esclareciendo mi mente con tu infinita sabiduría, te agradezco profundamente. En los momentos de duda y desaliento, has sido mi fortaleza, impidiéndome renunciar a aquello que, en mi limitada visión, creía imposible. Hoy te dedico este logro y te doy gracias, mi Dios.

A mi padre

A mi padre Víctor Cifuentes, por ser mi ejemplo de lucha y perseverancia, quien, desde tu esfuerzo, tus sacrificios y tu amor infinito me han dado la fuerza para llegar hasta aquí. Gracias por ser el mejor ejemplo de valentía y dedicación que un hijo podría tener, gracias por todo tu amor, te amo padre mío.

A mi abuela

A mi abuela María Cenaida Manyoma Mosquera, tu presencia, aunque invisible, sigue siendo una fuerza que me impulsa y me consuela. Cada vez que miro al cielo, sé que estás ahí como mi ángel guardián, como siempre estuviste para mí en todos los momentos de mi vida. Por eso, aunque no estés presente físicamente, te dedico este logro, porque este logro es mío y tuyo, mi ángel lindo.

A mi madre y hermano

Mi madre Norma Milena Manyoma y Jaider Andrés Manyoma, mis otros dos pilares de mi vida, mi refugio incondicional, mi motivo para seguir adelante y mi mayor apoyo en cada reto que la vida ha puesto en mi camino.

A mi mejor amiga

Andrea Díaz, quien ha sido mi confidente, mi casi hermana, apoyándome con tu amistad sincera y tu energía única. Gracias por ser esa persona, que nunca me dejó en mis momentos malos, que siempre encuentra la manera apoyarme, que escucha sin juzgar y que me impulsa a ser mejor cada día.

A mi grupo de patinaje

Camilo Obando, Yudithza Orejuela, Camila Rivera, Jhazwara Sánchez y Arbey Dueñas quien ahora está en el cielo, con ustedes compartí risas, una amistad que ha resistido el paso del

tiempo. Gracias por estar ahí, por los recuerdos inolvidables, por cada conversación de enseñanza. Gracias por todo los momentos y enseñarme lo que significa la palabra amistad.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	8
Abstract	9
Glosario	10
Introducción	13
1. Desarrollo del estado del Arte	15
1.1. Delimitación del Problema.....	15
1.2. Características de la muestra documental	16
1.3. Aspectos importantes a la implementación de las nuevas tecnologías aplicadas al sector agrícola para la reducción de plaguicidas	17
1.3.1. <i>Beneficios ambientales y sociales al emplear nuevas tecnologías para reducir los plaguicidas en el sector agrícola</i>	17
1.3.2. <i>Impacto de los plaguicidas en la salud humana</i>	19
1.3.3. <i>Innovaciones Tecnológicas en el Sector Agrícola para Reducir Plaguicidas y Mejorar el Medio Ambiente y la Salud Humana</i>	22
1.3.3.1. Ingeniería agrícola.....	23
1.3.3.2. Biotecnología	28
1.3.3.3. Organismos Genéticamente Modificados	32
2. Discusión	34
2.1. Nuevas tecnologías clave para la sostenibilidad agrícola: Reducción de plaguicidas y protección ambiental y de la salud.....	34
2.2. Beneficios al medio ambiente y a la salud al usar las nuevas tecnologías en el sector agrícola	37
2.3. Desafíos y perspectivas de las tecnologías agrícolas para reducir plaguicidas y promover la salud pública	38
Conclusiones	41
Recomendaciones	43
Referencias Bibliográficas	45

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Estrategia para la revisión bibliográfica	16
Tabla 2 . Artículos con enfoque en salud pública	20
Tabla 3. Artículos con enfoque en Ingeniería agrícola	25
Tabla 4. Artículos con enfoque en Biotecnología.....	29

Resumen

El crecimiento demográfico y la mejora en las condiciones socioeconómicas han llevado a un aumento en la demanda de alimentos, lo que a su vez ha impulsado una mayor la producción agrícola y la sobreexplotación de la tierra cultivable. El uso de pesticidas y fertilizantes desempeñan un papel fundamental en el progreso de los cultivos y la seguridad alimentaria. No obstante, el uso excesivo ha dado lugar a riesgos ambientales y riesgos a la salud humana que hoy en día son notorios.

Las nuevas tecnologías agrícolas ofrecen soluciones prometedoras para reducir los riesgos asociados con el uso de plaguicidas, mejorando la sostenibilidad y la seguridad en la producción de alimentos. La agricultura de precisión, los biopesticidas y los sistemas de apoyo a la decisión han demostrado ser particularmente efectivos en la reducción del uso de productos químicos y la optimización de los recursos.

En este documento, se presenta un estado del arte sobre el impacto de las nuevas tecnologías en la reducción del uso de plaguicidas y sus efectos en la salud y el medio ambiente. Para esto, se realizó una revisión 54 artículos que fueron seleccionados en función de criterios específicos de las bases de datos Springer Link, Science Direct, Google Scholar y Academic Search Ultimate. Los estudios revisados indican que la implementación de estas tecnologías puede aumentar los rendimientos agrícolas altamente dependiendo del tipo de cultivo y las condiciones locales. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías en países en desarrollo enfrenta desafíos considerables, señalando que la alta inversión inicial, la falta de conciencia y la baja capacidad de asumir riesgos son los principales obstáculos para la adopción de estas innovaciones.

Para superar estas barreras, es fundamental desarrollar políticas públicas que promuevan la adopción de tecnologías sostenibles, proporcionar incentivos económicos y mejorar el acceso a la capacitación técnica. Además, se requiere una mayor inversión en investigación y desarrollo para adaptar estas tecnologías a las condiciones locales y hacerlas más accesibles para los pequeños agricultores. La colaboración entre instituciones académicas, gobiernos y el sector privado sería crucial para impulsar la innovación y garantizar que los beneficios de estas tecnologías lleguen a todos los agricultores, independientemente de su escala o ubicación geográfica.

Palabras clave: *Nuevas tecnologías, innovación, plaguicidas, sector agrícola, salud humana, recuperación ambiental*

Abstract

Population growth and improved socioeconomic conditions have led to increased food demand, driving agricultural production and the overexploitation of arable land. Pesticides and fertilizers play a crucial role in crop development and food security. However, excessive use has resulted in significant environmental and human health risks.

Emerging agricultural technologies offer promising solutions to mitigate the risks associated with pesticide use, enhancing sustainability and food production safety. Precision agriculture, biopesticides, and decision-support systems have proven particularly effective in reducing chemical usage and optimizing resources.

This study presents a state-of-the-art review on the impact of new technologies in minimizing pesticide application and their effects on health and the environment. A total of 54 articles were selected based on specific criteria from Springer Link, Science Direct, Google Scholar, and Academic Search Ultimate. The reviewed studies indicate that these technologies can improve agricultural yields, depending on crop type and local conditions. However, their adoption in developing countries faces significant challenges, including high initial investment, low awareness, and limited risk tolerance.

To overcome these barriers, it is essential to develop public policies that promote sustainable technology adoption, provide economic incentives, and enhance access to technical training. Additionally, increased investment in research and development is required to adapt these technologies to local conditions and make them more accessible to small-scale farmers. Collaboration between academic institutions, governments, and the private sector is crucial to fostering innovation and ensuring that these technologies benefit all farmers, regardless of their scale or location.

Keywords: *New technologies, innovation, pesticides, agricultural sector, human health, environmental recovery.*

Glosario

Agricultura de ambiente controlado: Corresponde al método en el que se pueden controlar las condiciones ambientales en las que se desarrollan los cultivos, generalmente se producen en espacios cerrados como lo es el caso de invernaderos, cámaras de crecimiento y granjas de interior, este método permite controlar variables como la temperatura, humedad, luz, ventilación, CO₂, entre otros (Schnack et al., 2024).

Agricultura digital: Es una herramienta tecnológica que contribuye a la evolución de la agricultura hacia una industria digitalizada aprovechando la tecnología digital para analizar diversas variables como la humedad, temperatura, exposición solar, entre otros (FAO, 2022).

Agricultura de Precisión: Es un método que utiliza tecnologías avanzadas (como GPS y sensores) para monitorear y gestionar cultivos de manera más eficiente, optimizando el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas (Yatribi, 2020).

Agricultura regenerativa: Es una forma de cultivar que no solo evita dañar el medio ambiente, sino que activamente lo mejora. Utiliza prácticas que restauran la salud del suelo, aumentan la biodiversidad y capturan carbono de la atmósfera (Ranganathan, Waite, Searchinger, & Zions, 2020).

Agricultura vertical: Técnica de cultivo innovadora que busca optimizar el uso del espacio significando apilar varias capas de plantas una encima de otra, generalmente se construyen en espacios cerrados (Rakholia et al., 2024).

Automatización agrícola: Consiste en el uso de tecnologías para realizar tareas de forma automática, con los sensores y los robots que se basan en el aprendizaje automático es factible automatizar el diagnóstico y la toma de decisiones (Schnack et al., 2024).

Biopesticidas: Los pesticidas ecológicos son una alternativa a los pesticidas químicos, estas sustancias son derivadas de fuentes naturales como microorganismos y plantas (Singh et al, 2024).

Drones agrícolas: Estos pequeños equipos sobrevuelan los campos, tomando fotos y recopilando datos que ayudan a detectar problemas en los cultivos antes de que se vuelvan graves. Es como tener un asistente que puede ver todo el campo de un vistazo (Abderahman, Alireza, Karim, & Horst, 2022).

Desarrollo agrícola: Es el proceso de mejorar la forma en que cultivamos alimentos, haciéndolo más eficiente y sostenible. (Mateu Tortosa , 1993).

Edición genética: Permite la modificación de las plantas para mejorar sus características, esta edición está encaminada a que las plantas sean más resistentes a plagas y enfermedades (Nuñez & Barberena, s.f.).

Fertilizantes: Son como vitaminas para las plantas. Pueden ser naturales, como el compost o el estiércol, o químicos. Los fertilizantes biológicos, por ejemplo, utilizan microorganismos beneficiosos para mejorar la nutrición de las plantas y la salud del suelo (Mateu Tortosa , 1993).

Efectos colaterales: Son las consecuencias no deseadas o imprevistas del uso de ciertas prácticas o productos agrícolas. Por ejemplo, el uso excesivo de fertilizantes químicos puede llevar a la contaminación del agua subterránea (Wei, Mengmeng, & Varennyam, 2025).

Efluentes agrícolas: Son los desechos líquidos que se generan en las actividades agrícolas, como el agua de riego que escurre de los campos. (Ahmed, Sara Taha, Sundas Rana, & Man Qun, 2021).

Fungicidas: Producto químico que tiene la posibilidad de destruir hongos, también corresponde a los compuestos que proporcionan resistencia a la planta huésped (García, 2011).

Hidroponía: Sistema que permite el desarrollo del cultivo de plantas en un medio diferente al suelo, permitiendo el uso más eficiente del agua y los nutrientes (Beltrano & Gimenez, 2015).

Inteligencia artificial: Consiste en el uso de tecnologías para el análisis de datos que ayudan a la optimización de los recursos, la predicción de plagas y enfermedades, la reducción del uso de pesticidas y fertilizantes y la generación de pronósticos precisos (Qayyum et al., 2023).

Plaguicidas: Son sustancias que se utilizan para proteger los cultivos de plagas y enfermedades. Sin embargo, su uso excesivo puede tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana, por lo que se buscan alternativas más sostenibles (Cropin, 2021).

Seguridad alimentaria: Acceso físico y económico suficiente de alimentos seguros y nutritivos para satisfacer las necesidades alimenticias (Cumbre mundial de alimentación, 1996).

Sostenibilidad: Satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Comisión Brundtland, 1987).

Plaguicidas Organoclorados: Compuestos químicos sintéticos utilizados en la agricultura y el control de plagas debido a su alta estabilidad y eficacia. Se caracterizan por su

persistencia en el ambiente, su capacidad de bioacumulación en organismos vivos y su toxicidad para la salud humana y la fauna. Entre los más conocidos se encuentran el DDT, el Lindano, el aldrin y el endosulfán, muchos de los cuales han sido prohibidos o restringidos debido a sus efectos adversos sobre el ecosistema y la salud pública (Uzcátegui, Araujo, & Mendoza, 2011).

Introducción

La agricultura es una de las actividades fundamentales para el sustento de la población humana dado que proporciona los alimentos indispensables para satisfacer las necesidades básicas como: los cereales, frutas y vegetales. Sin embargo, en su proceso se usan agroquímicos con el propósito de controlar las plagas y enfermedades que pueden estar presentes en los alimentos (Hidalgo, 2017).

En consecuencia, la agricultura enfrenta desafíos significativos en términos de salud pública y sostenibilidad ambiental, especialmente debido al uso intensivo de plaguicidas y otros productos químicos; estos compuestos, aunque son esenciales para el control de plagas y enfermedades en los cultivos, han generado preocupaciones crecientes sobre sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente (Hidalgo, 2017). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2021), el uso excesivo de plaguicidas ha contribuido a la degradación de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y problemas de salud en comunidades agrícolas.

En este contexto, surge la necesidad de adoptar nuevas tecnologías agrícolas que no solo optimicen la producción, sino que también minimicen los riesgos asociados con el uso de plaguicidas y otros productos químicos (CEPAL et al, 2021). Las nuevas tecnologías, como la agricultura de precisión, el uso de drones y sensores, están revolucionando el sector agrícola al permitir un manejo más eficiente y seguro de los insumos agroquímicos (Tovar, 2023); estas innovaciones permiten a los agricultores aplicar plaguicidas de manera más precisa, reduciendo así la cantidad necesaria y limitando la exposición a productos tóxicos (Emerging Agricultural Technologies Working Group, 2021).

A pesar de los beneficios potenciales que ofrecen estas tecnologías emergentes, su implementación enfrenta varios obstáculos, dentro de los que se destacan la falta de capacitación técnica entre los agricultores y la resistencia al cambio los cuales son desafíos comunes que deben abordarse para garantizar una adopción exitosa; así mismo, es fundamental desarrollar políticas públicas que apoyen estas transiciones hacia prácticas más sostenibles y seguras (JRC , 2024).

Colombia es un país con una fuerte actividad agrícola, caracterizado por su diversidad climática y edafológica, lo que le permite cultivar una amplia variedad de productos (Reyes, Oliveros, Racedo, & Bernal Giraldo, 2024). Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

(2022), el sector agropecuario representa una parte fundamental de la economía del país, con cultivos como café, banano, palma de aceite y flores entre los principales productos de exportación.

El desafío para Colombia es significativo, especialmente en el contexto de la creciente liberalización del comercio de productos agrícolas y alimentos, por lo cual se debe fortalecer la capacidad de investigación relacionada con la residualidad química en alimentos y desarrollar una agenda de investigación que se enfoque en los aspectos prioritarios para contribuir a la solución de esta problemática (Márquez, 2008).

El presente Estado del Arte, El presente Estado del Arte tiene como objetivo analizar las tecnologías emergentes en el sector agrícola orientadas a la reducción del uso de plaguicidas. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica basada en la consulta de artículos científicos, informes, secciones de libros y estudios de caso publicados en los últimos años. La selección de fuentes se realizó a partir de bases de datos especializadas, como Springer Link, ScienceDirect y Google Scholar, priorizando aquellas con rigor académico y relevancia en el campo. Asimismo, se consideraron documentos en español, inglés y otros idiomas para garantizar una perspectiva amplia y actualizada. Además, se identificaron los principales enfoques utilizados en la implementación de estas tecnologías, con el propósito de comprender su impacto en la salud humana y el medioambiente.

1. Desarrollo del estado del Arte

1.1. Delimitación del Problema

El uso de pesticidas en la agricultura está en constante aumento a nivel mundial, esto se puede evidenciar países como Kazajstán, donde el uso de pesticidas por unidad de área de tierra agrícola se ha triplicado en la última década, pasando de 0.2 kg/ha en 2008 a 0.593 kg/ha en 2018; aunque estas cifras son inferiores a las de países como China o Ucrania, la tendencia al alza es preocupante y refleja una situación global que requiere atención urgente (Kenenbayev S, Yessenbayeva G, Zhanbyrbayev Y, & Tabynbayeva I, 2024).

El uso indiscriminado de plaguicidas en la agricultura moderna ha generado graves problemas de salud pública y daños al medio ambiente a nivel global; a pesar de su eficacia para controlar plagas y aumentar la producción agrícola, los plaguicidas convencionales representan un riesgo significativo debido a su toxicidad y persistencia en el ambiente (Hladik, Main, & Goulson, 2018). Se estima que más del 95% de los herbicidas y el 98% de los insecticidas aplicados alcanzan destinos diferentes a sus especies objetivo, contaminando suelos, agua y aire (Möhring, Gaba, & Finger, 2019), generando la acumulación de residuos tóxicos en los alimentos y la degradación de ecosistemas (Silva et al, 2014).

En Colombia, la situación respecto a la residualidad química en alimentos es preocupante, estudios realizados en diferentes regiones del país han revelado la presencia de residuos de plaguicidas organoclorados en leche y otros productos agrícolas, en niveles que superan los límites permitidos por la FAO/OMS (Márquez Lara, 2008). Esta situación pone de manifiesto la urgente necesidad de implementar estrategias de inocuidad alimentaria basadas en el enfoque de la cadena alimentaria, tal como lo recomienda la FAO.

Sumado a esto la contaminación por plaguicidas amenaza la seguridad alimentaria global al degradar la calidad del suelo y reducir las poblaciones de polinizadores esenciales para la producción de cultivos (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019).

1.2. Características de la muestra documental

Se llevó a cabo una revisión sistemática siguiendo la metodología adoptada por Bramer, Rethlefsen, Kleijnen y Franco (2017), aplicando los criterios de inclusión y exclusión. Este enfoque establece un protocolo de búsqueda para obtener una amplia variedad de registros bibliográficos relevantes, teniendo en cuenta preguntas de investigación específicas y una fórmula de búsqueda. Esto es fundamental, ya que garantiza la selección de estudios pertinentes y de alta calidad, como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Estrategia para la revisión bibliográfica

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>
<i>Preguntas Formuladas</i>	• ¿Cuáles son las tecnologías agrícolas más recientes para reducir el uso de pesticidas? • ¿Qué innovaciones en agricultura de precisión ayudan a disminuir la aplicación de plaguicidas? • ¿Cómo la inteligencia artificial y el aprendizaje automático están optimizando el control de plagas en la agricultura?
<i>Estrategias de Búsqueda</i>	• Ecuación de búsqueda PIR (<i>Agricultural technology AND pesticide reduction AND (human health OR environment)</i>) / (<i>Tecnología agrícola AND reducción de plaguicidas AND (salud humana OR medioambiente)</i>) • Bases de Datos: Springer Link, Science Direct, Google Scholar y Academic Search Ultimate • Idioma de artículos: inglés y español • Año de publicación: 2014 al 2024
<i>Criterios de inclusión/Exclusión</i>	Inclusión: • Investigaciones, libros, seminarios, congresos y algunos capítulos de unos libros que abordan la implementación de nuevas tecnologías en el sector agrícola con el objetivo de reducir o sustituir el uso de plaguicidas que afectan la salud humana y del medio ambiente • Investigaciones realizadas en el sector agrícola que exploren el uso de tecnologías innovadoras para la reducir las afectaciones a la salud humana y ambiental por los plaguicidas en diferentes áreas como India, China, África, Estados Unidos, España, Japón, México, Australia y una parte de América latina. Exclusión: • No aplica en los criterios ya mencionados • Conferencia, seminarios. • Documentos duplicados. • Acceso restringido.

Nota: Elaboración propia a partir de la estrategia de búsqueda de (Bramer, Rethlefsen, Kleijnen, & Franco, 2017).

Después de realizar la ecuación de búsqueda en las bases de datos mencionadas en la Tabla 1 y aplicar los criterios establecidos, se obtuvieron inicialmente diez (10) documentos en *Springer Link*, aproximadamente cinco mil (5000) en *ScienceDirect*, dos mil (2000) en *Google Scholar* y veinte (20) en *Academic Search Ultimate*. Luego, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión, eliminando documentos duplicados, seleccionando aquellos con acceso a texto completo y verificando su relevancia temática. Se incluyeron investigaciones, libros, seminarios, congresos y algunos capítulos de libros que abordan la implementación de nuevas tecnologías en el sector agrícola con el objetivo de reducir o sustituir el uso de plaguicidas que afectan la salud humana y el medio ambiente, así como estudios realizados en este sector que exploren el uso de tecnologías innovadoras para minimizar dichas afectaciones en regiones como India, China, África, Estados Unidos, España, Japón, México, Australia y parte de América Latina. Por otro lado, se excluyeron aquellos documentos que no cumplieran con estos criterios, así como conferencias, seminarios, documentos duplicados y publicaciones con acceso restringido. Como resultado final, se seleccionaron 50 documentos en idioma inglés y español: seis (6) en *Springer Link*, diecinueve (19) en *ScienceDirect*, diecinueve (19) en *Google Scholar* y seis (6) en *Academic Search Ultimate*.

1.3. Aspectos importantes a la implementación de las nuevas tecnologías aplicadas al sector agrícola para la reducción de plaguicidas

1.3.1. Beneficios ambientales y sociales al emplear nuevas tecnologías para reducir los plaguicidas en el sector agrícola

Las nuevas tecnologías, como el uso de bioinsumos y la agricultura de precisión, presentan una solución viable para reducir la dependencia de los plaguicidas. La inteligencia artificial ha transformado la forma en que se maneja las plagas por parte de los agricultores, su implementación puede ayudar a garantizar una intervención mucho más precisa y menos invasiva; no obstante, el uso de dichas tecnologías enfrenta numerosos obstáculos, especialmente en las zonas rurales de

los países en desarrollo, debido a que la infraestructura técnica no está bien desarrollada y hay ausencia de conocimiento para su uso (Vidya Madhuri, y otros, 2025).

Ostos Ortiz (2024) señala que las nuevas tecnologías son efectivas en la reducción de plaguicidas, pero su generalización depende de políticas públicas sólidas que permitan el acceso y fomenten la capacitación de los agricultores.

Por otra parte, las nuevas tecnologías pueden ser una solución prometedora para abordar los peligros mencionados anteriormente en el uso masivo de productos químicos agrícolas, no obstante, es evidente que su implementación efectiva en todas enfrenta desafíos debido a la influencia de factores sociales, económicos y políticos (INS, 2021). Palacios (2024) destacó que tal adopción exigiría políticas que faciliten la celebración de acuerdos de implementación en su país, lo que significa la promoción de la capacitación de agricultores y la provisión de infraestructura técnica en zonas rurales; así mismo, la propuesta de incentivos fiscales y subsidios se vuelven una estrategia clave para facilitar la transición dado que los agricultores reducirían sus costos de implementación. Si bien resulta claro que la perspectiva hacia una agricultura menos receptiva de pesticidas no es completamente desprovista de oportunidades, todavía hay brechas significativas en la equidad de acceso a tecnología que queda por resolver (Hilarión, 2024).

Los plaguicidas representan un desafío significativo para el medio ambiente y la salud humana debido a su capacidad de bioacumulación y efectos adversos a largo plazo, sin embargo, las nuevas tecnologías ofrecen soluciones prometedoras para su eliminación y manejo más sostenible (FAO, 2022).

La implementación de estas tecnologías, junto con prácticas de manejo integrado de plagas y políticas más estrictas, puede contribuir significativamente a reducir el uso y el impacto ambiental de los plaguicidas persistentes (Ansari, y otros, 2024). La biorremediación microbiana ha demostrado ser un método eficaz y económico para degradar contaminantes como el endosulfán en el suelo y el agua. Por ejemplo, ciertas especies de bacterias como *Klebsiella oxytoca* y hongos como *Aspergillus Niger* han mostrado capacidad para descomponer el endosulfán en metabolitos menos tóxicos, además, el uso de nanosensores colorimétricos basados en nanopartículas permite una detección más rápida y sensible de residuos de plaguicidas. Además, Carrer et al (2022) destaca la disminución de la exposición humana a estos químicos peligrosos, contribuyendo a la reducción de los riesgos para la salud asociados con los plaguicidas, como trastornos endocrinos, problemas reproductivos y ciertos tipos de cáncer.

Desde otra perspectiva, el estudio realizado por Kenenbáyev et al (2024) se denota que las plantas sanas cultivadas en suelos sanos y con una dieta equilibrada son capaces de resistir a las plagas por sí mismas, en concordancia, la fertilidad y el aumento de la productividad del suelo deben implementarse a través de la aplicación y activación de métodos biológicos por medio del uso de fertilizantes orgánicos y biológicos, siendo estos últimos métodos altamente respetuosos con el medio ambiente haciendo énfasis en que los abonos orgánicos producen la absorción de nutrientes por parte de los microorganismos del suelo reduciendo la posibilidad de lixiviación.

1.3.2. Impacto de los plaguicidas en la salud humana

Diversas investigaciones como la llevada a cabo por Zhou et al (2024) a través de una revisión documental se recopilaron datos acerca de los peligros que se identificaron para la seguridad alimentaria en las distintas prácticas de la agricultura, enfatizando en que existen peligros como patógenos y microorganismos transmitidos por alimentos, elementos potencialmente tóxicos, residuos de pesticidas, contaminantes orgánicos persistentes, contenido de nitritos y nitratos, microfauna y parásitos celulares, productos farmacéuticos, materiales peligrosos y xenobióticos orgánicos.

Partiendo de lo anteriormente mencionado, los pesticidas se emplean con fines agrícolas, aun así, esto conlleva a problemas ambientales globales y afectan la salud humana; los pesticidas organoclorados son persistentes a causa de su naturaleza estable, por lo que los residuos de estos pesticidas están presentes en diversos productos alimenticios generando graves efectos para la salud y el medio ambiente (Ansari et al., 2024).

A largo plazo, los pesticidas afectan la diversidad microbiana del suelo, reduciendo su fertilidad y afectando los procesos biogeoquímicos esenciales, no obstante, la investigación señala que el suelo puede recuperarse si se reduce o detiene el uso de estos productos químicos, mejorando la salud del suelo mediante prácticas agrícolas orgánicas y técnicas de biorremediación, en lo referente al recurso hídrico, los pesticidas representan un riesgo considerable dado que afectan las fuentes de agua potable, por lo que las organizaciones reguladoras han establecido límites para los residuos de pesticidas en el agua potable, con el objetivo de proteger la salud humana (Zhou et al., 2024).

En cuanto a los efectos en la salud humana, la exposición a compuestos tóxicos como los organoclorados y organofosforados pueden causar daño al sistema nervioso, cáncer y otros problemas de salud. Se estima que anualmente hay millones de casos de intoxicación aguda por pesticidas en todo el mundo, lo que subraya la necesidad de prácticas de gestión más sostenibles para mitigar estos impactos. Es por ello por lo que existe una alta necesidad de adoptar tratamientos que prioricen la sostenibilidad y la salud ambiental en la agricultura, dentro de estos tratamientos se destacan las reformas agrícolas haciendo énfasis en el uso de pesticidas naturales (Márquez, 2008).

Dentro de las acciones globales que se llevan a cabo para la minimización del uso de estos pesticidas se resaltan la eliminación del mercado internacional conforme al convenio de Estocolmo del PNUMA celebrado en 2011, así mismo, los microorganismos tienen gran relevancia en la degradación de contaminantes reduciendo la toxicidad de estos.

Las innovaciones tecnológicas en el sector agrícola desempeñan un papel fundamental en la reducción de uso de plaguicidas, protegiendo de tal modo la salud pública y el medio ambiente; al implementar el uso de tecnologías de precisión, biopesticidas, sistemas de monitoreo, entre otros, es posible lograr una producción agrícola sostenible dando paso al equilibrio entre la producción agrícola eficiente y la preservación de la salud humana y el entorno natural (Sang, 2023).

En la Tabla 2, se presentan las producciones documentales que fueron consideradas dentro del enfoque de la salud pública.

Tabla 2 . Artículos con enfoque en salud pública

Título	Autor	Año de publicación
A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage	Wei Zhou, Mengmeng Li, Varenayam Achal	2024
Reviewing chemical and biological risks in urban agriculture: A comprehensive framework for a food safety assessment of city region food systems	E. Buscaroli, I. Braschi, C. Cirillo, A. Fargue-Lelièvre, GC Modarelli, G. Pennisi, I. Righini, K. Specht, F. Orsini	2021
Persistent pesticides: Accumulation, health risk assessment, management and remediation: An overview	Iqbal Ansari, Maha M. El-Kady, Alaa El Din Mahmoud, Charu Arora, Aazad Verma, Ravikumar Rajarathinama, Priyanka Sing, Dakeshwar Kumar Verma, Jyoti Mittal	2024

Tabla 2. Continuación

Factors affecting farmers' decisions on fertilizer use: A case study for the Chaobai watershed in Northern China	Yuan Zhou,Hong Yang,Hans-Joachim Mosler,Karim C. Abbaspour	2010
Factores de riesgo en trabajadores del sector agrícola, una revisión bibliográfica	Lina María Lumbaque Melo	2021
Riesgos laborales en trabajadores latinoamericanos del sector agrícola: Una revisión sistemática	Johana Madelyn Matabanchoy-Salazar Fátima Díaz-Bambula	2021
Residuos químicos en alimentos de origen animal: problemas y desafíos para la inocuidad alimentaria en Colombia	Márquez Lara, Dildo	2008
Análisis a la implementación del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo para el sector agrícola en algunos departamentos de Colombia en el año 2018	Alejandra Ospina Marin, Liliana Gallego Ramirez, Maria Emilia Aranzazu Arango	2019
Salud ambiental en localidades agrícolas expuestas a plaguicidas en Sonora	Adrián Israel Yáñez Quijada, Beatriz Olivia Camarena Gómez	2019
Formulación de medidas de prevención y control frente al riesgo químico para trabajadores de fincas cafeteras en Colombia	Luz Mayeli Mejia Montoya, Carlos Andres Hernandez Cifuentes	2021
Estudiar los impactos en la salud debido a la exposición de los órganos fosforados en los trabajadores agrícolas del GADPC	Edison Paúl Coque Acosta	2024
Plaguicidas químicos usados en el cultivo de soya en el Departamento de Santa Cruz, Bolivia: riesgos para la salud humana y toxicidad ambiental	Bascope Zanabria, Roberto; Bickel, Ulrike; Jacobi, Johanna	2019
Uso de plaguicidas inhibidores de acetilcolinesterasa en once entidades territoriales de salud en Colombia, 2002-2005	Omayda Cárdenas, Elizabeth Silva, Jaime Eduardo Ortiz	2010
Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change	Thierry Brunelle, Rey Chakir, Alain Carpentier, Bruno Dorin, Daniel Goll, Nicolás Guilpart, Federico Maggi, David Makowski, Thomas Nesme, Jutta Roosen yFiona HM Tang	2024
Detection technology of pesticide residues in agricultural products based on chemical detection means	Xiao Sang	2023
Human health risk assessment of pesticides used for rice cultivation in an agricultural pocket of Eastern India.	Bhoi, Rosismita;Mahananda, Malaya Ranjan;Pradhan, Abanti	2022
Pesticides in different environmental compartments in Brazil: a review.	Mayane Prado de Oliveira I , Anny Beatriz Santana e Silva I,Cesar Vinicius Tonicioilli Rigueto II, Raquel Aparecida Loss I,Sumaya Ferreira Guedes I, Claudineia Aparecida Queli Geraldi	2023
Pesticides; a necessary evil intheagricultural value chain-areview	Joshua Yeboah Asiamah, Josiah Wilson Tachie-Menson, Daniel Sakyi Agyirifo,Rosemary Agbeko, Frank Essem	2020

Las investigaciones recientes han abordado desde diversas perspectivas el impacto del uso de plaguicidas en la agricultura y las estrategias tecnológicas para reducir su dependencia. Autores como Zhou, Li y Achal (2024) han realizado un análisis integral sobre los efectos ambientales y en la salud humana derivados del uso de plaguicidas químicos, destacando la necesidad urgente de soluciones sostenibles. De manera complementaria, Ansari et al. (2024) han abordado la persistencia de estos químicos en el medioambiente y las estrategias para su remediación.

En este contexto, han surgido diferentes enfoques tecnológicos orientados a la reducción del impacto de los plaguicidas. Uno de estos es la bioagricultura, la cual ha demostrado ser una alternativa viable a los métodos convencionales. Investigaciones como las de Bhoi, Mahananda y Pradhan (2022) han evaluado los riesgos para la salud humana derivados del uso de plaguicidas en cultivos de arroz, resaltando la importancia de implementar biofertilizantes y biopesticidas para mitigar dichos efectos. Por otro lado, Buscaroli et al. (2021) han propuesto un marco para evaluar los riesgos biológicos y químicos en la agricultura urbana, lo que refuerza la idea de adoptar prácticas más seguras en la producción de alimentos.

Otro enfoque clave es el uso de tecnologías avanzadas para la detección y monitoreo de plaguicidas. Xiao Sang (2023) ha desarrollado metodologías basadas en detección química para identificar residuos de plaguicidas en productos agrícolas, facilitando la implementación de estrategias de control y reducción. Asimismo, Brunelle et al. (2024) argumentan que la reducción del uso de insumos químicos no solo depende de innovaciones tecnológicas, sino también de cambios estructurales en el sistema agrícola global.

Desde una perspectiva social y de salud humana, diversos estudios han analizado los efectos de los plaguicidas en los trabajadores del sector agrícola. Matabanchoy-Salazar y Díaz-Bambula (2021) han evidenciado los riesgos laborales en América Latina, mientras que Yáñez Quijada y Camarena Gómez (2019) han documentado la exposición a plaguicidas en comunidades agrícolas de Sonora, México. En el caso colombiano, investigaciones como las de Márquez Lara (2008) han señalado la presencia de residuos químicos en alimentos de origen animal, lo que plantea desafíos para la seguridad alimentaria y la salud de los consumidores.

1.3.3. Innovaciones Tecnológicas en el Sector Agrícola para Reducir Plaguicidas y Mejorar el Medio Ambiente y la Salud Humana

Las investigaciones recientes en el sector agrícola han comenzado a centrarse en enfoques que no solo buscan reducir el uso de plaguicidas, sino también mitigar sus efectos en la salud humana y el medioambiente. Esta tendencia responde a la creciente necesidad de soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas. En este estudio, se han identificado tres enfoques principales que reflejan esta evolución: salud pública, ingeniería agrícola y biotecnología, los cuales se analizarán a continuación.

1.3.3.1. Ingeniería agrícola. Las tecnologías de agricultura inteligente (Smart Farming) ofrecen un gran potencial para transformar y mejorar la producción agrícola. Según el documento, estas tecnologías permiten la incorporación de sistemas de información y comunicación en maquinaria, equipos y sensores utilizados en los sistemas de producción agrícola, lo previamente mencionado facilita la generación de grandes volúmenes de datos e información, así como la progresiva automatización de los procesos y pueden ayudar a reducir costos de producción, minimizar restricciones ambientales y hacer frente a desafíos como el cambio climático y la escasez de mano de obra (Pivoto et al., 2018).

En el sector agrícola, la Big Data en relación con diferentes elementos de la agricultura inteligente involucra diferentes aplicaciones como robótica y sensores para el monitoreo inteligente, y modelos de rendimiento y salud de cultivos para el análisis y planificación. En ganadería, se utilizan sensores biométricos y seguimiento GPS para el monitoreo, así como robots de ordeño para el control. En horticultura, se emplean computadoras de invernadero y sensores para el monitoreo, y sistemas de control de clima y control de precisión. En pesca, se utilizan Sistemas de Identificación Automática (AIS) para el monitoreo y vigilancia. Además, en todos los sectores se aprovechan datos en la nube como información meteorológica/climática, datos de rendimiento, tipos de suelo, información de mercado y datos de censos agrícolas para mejorar la toma de decisiones y la gestión agrícola (Wolfert, et al., 2017).

Según Klerkx & Rose (2020) estas tecnologías como la robótica, la nanotecnología, las proteínas sintéticas, la agricultura celular, la edición genética, la inteligencia artificial, el blockchain y el aprendizaje automático “pueden tener efectos generalizados en la agricultura y los sistemas alimentarios futuros y un gran potencial transformador”, al mismo tiempo, estas innovaciones podrían revolucionar la forma en que se produce, procesa, comercializa y consume los alimentos, aun así, advierten que es necesario considerar cuidadosamente los efectos de

inclusión y exclusión de estas tecnologías, así como reflexionar sobre cómo se relacionan con diversas vías de transición hacia sistemas agrícolas y alimentarios sostenibles.

Desde otra perspectiva, la tecnología de precisión en la agricultura ayuda a optimizar el uso de recursos, aumentar los rendimientos y reducir el impacto ambiental de las prácticas agrícolas. Un aspecto particularmente valioso del estudio es su enfoque en la adaptación de estas tecnologías para pequeños agricultores en países en desarrollo, por lo que reduce también el uso excesivo de productos químicos, disminuyendo así la contaminación del suelo y agua subterránea, de igual manera se reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero conforme la disminución del uso de combustible y fertilizantes, y conserva recursos naturales como el agua mediante técnicas de riego de precisión (Sharma et al., 2024).

Aggelopoulou et al. (2011) exploraron la variabilidad espacial del suelo y su impacto en la creación de mapas específicos de fertilización para un huerto de manzanas, en donde también hacían el uso de la precisión en un huerto de 0.8 hectáreas, este estudio a pesar del tamaño reducido existía una variabilidad espacial significativa en las propiedades químicas del suelo, lo que indica el potencial de la gestión sitio-específica. La aplicación localizada de nitrógeno, basada en mapas de rendimiento del año anterior, permitió un ahorro del 38% de este nutriente en comparación con la aplicación uniforme tradicional. Cabe destacar que, aunque el estudio se centró en fertilizantes, los principios de aplicación localizada podrían extenderse a otros insumos como plaguicidas, contribuyendo potencialmente a su reducción y a una agricultura más sostenible.

En Australia y Nueva Zelanda, el estudio realizado por Schnack et al. (2024), hace referencia a la aceptación del consumidor de tres tecnologías agrícolas sostenibles: agricultura de ambiente controlado (CEA), edición genética (GE) y automatización agrícola (FA). El estudio contribuye a la teoría examinando una nueva faceta de la aceptación del consumidor de tecnologías sostenibles y revela cómo los patrones de consumo, vida y estilo de vida motivan la aceptación de nuevas tecnologías en el sector agrícola.

Los estudios futuros deberían centrarse en el desarrollo de instrumentos de medición específicamente diseñados para captar las actitudes de los consumidores hacia las tecnologías agrícolas futuras, en donde lo ideal sería utilizar múltiples muestras para validar las medidas y proporcionar una visión más multifacética de las actitudes específicas de la agricultura. Dada la creciente dependencia de las tecnologías que respaldan la vida diaria, comprender la aceptación

de estas tecnologías por parte de los consumidores es un área fundamental y prometedora para futuras investigaciones (Schnack et al., 2024).

De acuerdo por la investigación que fue realizada por Carrer et al. (2017), también afirma que, al decidir adoptar una tecnología, los agricultores buscan maximizar su utilidad esperada. Así también reduciendo los costos y teniendo una producción continua y eficiente al futuro.

En la Tabla 3 se presentan los artículos analizados en el enfoque de Ingeniería Agrícola, agrupados según su contribución a la reducción de plaguicidas y la mejora en la eficiencia del sector agrícola. Estos estudios muestran diferentes tecnologías aplicadas y su impacto en la producción sostenible.

Tabla 3. *Artículos con enfoque en Ingeniería agrícola*

Título	Autor	Año de publicación
Influence of technology adoption on farmers' well-being: Systematic literature review and bibliometric analysis	Mariani Abdul-Majid, Siti Aisyah Zahari, Norfaizah Othman, Suhaila Nadzri.	2024
Application of digital technologies for ensuring agricultural productivity	Rambod Abiri, Nastaran Rizan, Siva K. Balasundram, Arash Bayat Shahbazi, Hazandy Abdul	2023
Adoption of smart farming technologies in field operations: A systematic review and future research agenda	Hazem Yusuf Osrof, Cheng Ling Tan, El armazón de Angappa, Sook Fern Yeo, Kim Hua Tan	2023
Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil	Marcelo José Carrer, Hildo Meirelles de Souza Filho, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Carlos Iván Mozambani	2022
Innovación inclusiva en el sector agrícola mexicano: los productores de café en Veracruz	Marcela Amaro-Rosales, Rebeca de Gortari-Rabiela	2016
Sustainable agricultural technologies of the future: Determination of adoption readiness for different consumer groups	Alexander Schnack, Fabián Bartsch, Victoria-Sophie Osburg, Amy Errmann	2024
Emerging technology adoption for sustainable agriculture in India– a pilot study	Rajnish Rakholia, Sastre Jinal, Mitul Prajapati, Manan Shah, atinderkumar R. Saini	2024
Advancements in technology and innovation for sustainable agriculture: Understanding and mitigating greenhouse gas emissions from agricultural soils	Muhammad Qayyum, Yanping Zhang, Mansi Wang, Yuyuan Yu, Shijie Li, Wasim Ahmad, Saleh N. Maodaa f, Shaban R.M. Sayed, Jiawei Gan	2023

Tabla 3. *Continuación*

Science and Technology Backyard: A novel approach to empower smallholder farmers for sustainable intensification of agriculture in China	JIAO Xiao-qiang, ZHANG Hong-yan, MA Wen-qi, WANG Chong, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo	2019
Is farmer-to-farmer extension effective? The impact of training on technology adoption and rice farming productivity in Tanzania	Yuko Nakano, Takuji W. Tsusaka, Takeshi Aida, Valerien O. Pede	2018
Difusión de nuevas tecnologías en la agricultura Valenciana, siglo XIX	Enrique Mateu Tortosa	1993
Nuevas tecnologías y agricultura 4.0: impacto en los recursos humanos de la industria agrícola en Centroamérica	Marion Wandel Marroquín	2021
Plan de adopción de nuevas tecnologías en producción agrícola para pequeños y medianos agricultores de la Región del Maule	David Mora Villar, Nicolás Mateluna Hernández	2021
Las patentes como indicadores de la innovación tecnológica en el sector agrario español y en su industria	Ramon Rivas, A. Casimiro Herruzo	2000
Nuevas tendencias de tecnologías de sensores inalámbricas para la mejora productiva de cultivos agrícolas	Roberto Fernández Martínez, Alpha Verónica Pernía, Espinoza, Andrés Sanz García, Jesús Las Heras Casas, Javier Alfonso Cendón	2010
Investigations of precision agriculture technologies with application to developing countries	Ankit Sharma, Apoorv Prakash, Shiva Bhambota & Santosh Kumar	2024
Research trends and emerging physical processing technologies in mitigation of pesticide residues on various food products	Ravi Pandiselvam, Rathnakumar Kaavya, Anandu Chandra Khanashyam, Valarivan Divya, Sajeeb Khan Abdullah, Fawzan Sigma Aurum, Rajendran Dakshyani, Anjineyulu Kothakota, Shunmugiah Veluchamy Ramesh & Amin Mousavi Khaneghah	2022
Agriculture for the Anthropocene: novel applications of technology and the future of food	Lenore Newman, Robert Newell, Colin Dring, Alesandros Glaros, Evan Fraser, Zsofia Mendly-Zambo, Arthur Gill Green & Krishna Bahadur KC	2023
Exploring the Impact of Digital Farming on Agricultural Engineering Practices	Raza, Aamir;Shahid, Muhammad Adnan;Safdar, Muhammad;Tariq, Muhammad Abdur Rehman	2023

El avance de la ingeniería agrícola ha sido impulsado por la adopción de tecnologías digitales y sistemas inteligentes que mejoran la eficiencia y sostenibilidad en la producción

agroalimentaria. Autores como Abdul-Majid et al. (2024) han analizado el impacto de la adopción de nuevas tecnologías en el bienestar de los agricultores, resaltando su papel en la optimización de procesos y la reducción de costos. De manera similar, Schnack et al. (2024) han explorado la disposición de distintos grupos de consumidores para la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles, evidenciando que la aceptación depende de factores socioeconómicos y de acceso a la información.

Uno de los avances más relevantes en el campo es la agricultura de precisión, que permite la optimización del uso de insumos mediante el análisis detallado de datos. Carrer et al. (2022) han demostrado cómo la adopción de estas tecnologías mejora la eficiencia técnica en la producción de caña de azúcar en Brasil, mientras que Sharma et al. (2024) han examinado su aplicación en países en desarrollo, destacando la necesidad de estrategias accesibles para su implementación. Asimismo, Osrof et al. (2023) han propuesto un marco para la adopción de tecnologías inteligentes en las operaciones agrícolas, con el objetivo de mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del sector.

La integración de sensores inalámbricos en la producción agrícola es otra tendencia clave para la modernización del sector. Fernández Martínez et al. (2010) han estudiado el impacto de estas tecnologías en la mejora productiva de los cultivos, mientras que Pandiselvam et al. (2022) han investigado su uso en la mitigación de residuos de plaguicidas en alimentos. Estas soluciones permiten una gestión más precisa de los recursos y contribuyen a la seguridad alimentaria.

El uso de tecnologías digitales y la agricultura 4.0 también ha revolucionado las prácticas agrícolas. Abiri et al. (2023) han analizado cómo la implementación de herramientas digitales garantiza la productividad agrícola a través del monitoreo remoto y la automatización de procesos. En la misma línea, Raza et al. (2023) han estudiado el impacto de la agricultura digital en la ingeniería agrícola, destacando su papel en la transformación de las prácticas tradicionales. Por su parte, Wandel Marroquín. (2021) ha abordado los efectos de la digitalización en los recursos humanos del sector agrícola en Centroamérica, señalando la necesidad de capacitación y adaptación a las nuevas tecnologías.

Desde un enfoque social y educativo, la difusión de tecnología entre pequeños agricultores ha sido un punto clave de estudio. Jiao et al. (2019) han desarrollado el concepto de Science and Technology Backyard, un enfoque innovador para capacitar a pequeños agricultores en China con el fin de intensificar la producción agrícola de manera sostenible. En un contexto similar, Nakano et al. (2018) han analizado la efectividad de la capacitación entre agricultores en Tanzania,

evidenciando que la transmisión de conocimientos impacta directamente en la adopción de tecnologías agrícolas.

Por otro lado, la historia de la innovación agrícola también ha sido objeto de estudio. Mateu Tortosa (1993) ha analizado la difusión de nuevas tecnologías en la agricultura valenciana del siglo XIX, ofreciendo una perspectiva sobre los factores que impulsan o dificultan la adopción de innovaciones en el sector. Asimismo, Rivas y Herruzo (2000) han explorado el papel de las patentes como indicadores del desarrollo tecnológico en la agricultura española.

Finalmente, la adopción de tecnologías emergentes ha sido estudiada en distintos contextos regionales. Rakholia et al. (2024) han llevado a cabo un estudio piloto en India sobre la implementación de tecnologías sostenibles en la agricultura, mientras que Mora Villar y Mateluna Hernández (2021) han propuesto planes de adopción tecnológica para pequeños y medianos agricultores en la Región del Maule, Chile.

1.3.3.2. Biotecnología. La biotecnología se ha consolidado como una estrategia clave para la reducción del uso de plaguicidas en la agricultura, especialmente mediante el desarrollo de biopesticidas, fertilizantes biológicos y microorganismos benéficos que permiten un control sostenible de plagas y enfermedades. Diferentes investigaciones han abordado esta temática desde enfoques complementarios, analizando la efectividad de estas tecnologías en la producción agrícola y su impacto ambiental.

El uso de biopesticidas naturales derivados de microorganismos como bacterias y hongos se ha consolidado como una alternativa eficaz a los plaguicidas sintéticos, ya que reduce la toxicidad en los suelos y minimiza los efectos adversos sobre la biodiversidad. Además, su adopción ha demostrado ser una estrategia clave para mitigar la contaminación ambiental, especialmente en el agua subterránea, donde se estima que puede reducir los niveles de contaminación hasta en un 40%, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas acuáticos (Bhoi, Mahananda, & Pradhan, 2022).

Otro grupo de estudios se centralizaron en la aplicación de fertilizantes biológico demostrando ser una estrategia eficaz para mejorar la salud del suelo, ya que aumenta la capacidad de retención de nutrientes y reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos (Chojnacka, 2024). Este tipo de fertilización, basada en residuos orgánicos y microorganismos, optimiza la calidad del suelo y fortalece la resistencia de los cultivos ante condiciones de estrés, como la sequía o la

salinidad (Yuvaraj et al., 2021). En particular, el uso de hongos micorrízicos arbusculares mejora la absorción de nutrientes y contribuye a la resiliencia de las plantas (Barrera, 2009).

En cuanto a la eficiencia en la absorción de nutrientes, el uso de halófitas y tecnologías basadas en microorganismos ha demostrado ser una estrategia efectiva para la restauración de suelos salinos, lo que amplía el potencial de la biotecnología en regiones afectadas por la desertificación (Navarro-Torre et al., 2023). Asimismo, la integración de biotecnología y agricultura regenerativa no solo incrementa la productividad, sino que también favorece la captura de carbono y contribuye a la mitigación del cambio climático (Sharma et al., 2024).

En la Tabla 4 se presentan los estudios analizados en el enfoque de Biotecnología, donde se destacan investigaciones sobre biopesticidas, fertilizantes biológicos y tecnologías para la recuperación de suelos degradados. En particular, los estudios de Singh et al. (2024) y Ambaye et al. (2024) evidencian el potencial de los biopesticidas en la reducción del uso de agroquímicos, mientras que Chojnacka (2024) y Yuvaraj et al. (2021) resaltan la importancia de la fertilización biológica en la sostenibilidad agrícola. Estos estudios en conjunto reflejan cómo la biotecnología está transformando las prácticas agrícolas hacia modelos más sostenibles y menos dependientes de productos químicos sintéticos.

Tabla 4. *Artículos con enfoque en Biotecnología*

Título	Autor	Año de publicación
Smart fertilizer technologies: An environmental impact assessment for sustainable agriculture	Sukhdeep Singh, Ravinder Singh, Kulpreet Singh, Karun Katoch, Ahmed A. Zaeen, Dereje A. Birhan a, Atinderpal Singh, Hardev S. Sandhu, Hardeep Singh, Lakesh K. Sahrma Teklit Gebregiorgis Ambaye, Aydin Hassani,	2024
Emerging technologies for the removal of pesticides from contaminated soils and their reuse in agriculture	Mentor Vaccari, Andrea Franzetti, Shiv Prasad, Francesca Formicola, Asia Rosatelli, Muhammad Zia su Rehman, Gunda Mohanakrishna, Sharanabasava V. Ganachari, Tejraj M. Aminabhavi, Sami Rtimi j	2024
Sustainable chemistry in adaptive agriculture: A review	Katarzyna Chojnacka	2024
Sustainable agricultural management of saline soils in arid and semi-arid Mediterranean regions through halophytes, microbial and soil-based technologies	Salvadora Navarro-Torre, Pedro Garcia-Caparrós, Amaia Nogales, Maria Manuela Abreu, Erika Santos, Ana Lúcia Cortinhas, Ana Delaunay Caperta	2023

Tabla 4. *Continuación*

Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology e A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability	Ananthanarayanan Yuvaraj, Ramasundaram Thangaraj, Balasubramani Ravindran, Soon Woong Chang, Natchimuthu Karmegam	2021
Identifying entry points to improve fertilizer use efficiency in Taihu Basin, China Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible	Li Maa, Shuyi Fenga, Pytrik Reidsma, Futian Qu, Nico Heerink	2014
Manejo sostenible de suelo con Agricultura de Conservación. Significado para el cultivo de arroz	Juan Sebastián Carvajal Muñoz, Adriana Consuelo Mera Benavides	2010
El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura	Theodor Friedrich	2017
Rendimiento del cultivo de yuca con abonos orgánicos y químicos en un suelo ácido	Silvia E. Barrer	2009
Sustainable regenerative agriculture allied with digital agri-technologies and future perspectives for transforming Indian agriculture	Enrique Miguel Combatt-Cabellero, Janer Miguel Polo-Santos, Alfredo De Jesús Jarma-Orosco	2017
On the effects that motivate pesticide use in perspective of designing a cropping system without pesticides but with mineral fertilizer—a review	Chhavi Sharma, Puneet Pathak, Anuj Kumar y Senh Gautam	2024
Green agriculture with negation of chemicals in kazakhstan	Isabell Pergner & Christian Lippert	2023
Influence of technology adoption on farmers' well-being: Systematic literature review and bibliometric analysis	Kenenbayev, S.; Yessenbayeva, G.; Zhanbyrbayev, Y.; Tabynbayeva, L.	2024
Application of digital technologies for ensuring agricultural productivity	Mariani Abdul-Majid, Siti Aisyah Zahari, Norfaizah Othman, Suhaila Nadzri.	2024
Adoption of smart farming technologies in field operations: A systematic review and future research agenda	Rambod Abiri, Nastaran Rizan, Siva K. Balasundram, Arash Bayat Shahbazi, Hazandy Abdul	2023
Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil	Hazem Yusuf Osrof, Cheng Ling Tan, El armazón de Angappa, Sook Fern Yeo, Kim Hua Tan	2023
Innovación inclusiva en el sector agrícola mexicano: los productores de café en Veracruz	Marcelo José Carrer, Hildo Meirelles de Souza Filho, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Carlos Iván Mozambani	2022
Sustainable agricultural technologies of the future: Determination of adoption readiness for different consumer groups	Marcela Amaro-Rosales, Rebeca de Gortari-Rabiela	2016
Emerging technology adoption for sustainable agriculture in India— a pilot study	Alexander Schnack, Fabián Bartsch, Victoria-Sophie Osburg, Amy Errmann	2024
	Rajnish Rakholia, Sastre Jinal, Mitul Prajapati, Manan Shah, atinderkumar R. Saini	2024

Uno de los temas centrales es el uso de fertilizantes inteligentes y biológicos, que buscan reducir el impacto ambiental sin comprometer la productividad. Singh et al. (2024) han evaluado los efectos ambientales de estas tecnologías en la agricultura sostenible, mientras que Ma et al. (2014) han identificado puntos clave para mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes en China. En esta línea, Carvajal Muñoz y Mera Benavides (2010) han explorado la fertilización biológica como una alternativa innovadora para el desarrollo agrícola sostenible. Por otro lado, Friedrich (2017) ha abordado la conservación del suelo en el cultivo de arroz mediante técnicas de manejo sostenible, y Barrer (2009) ha investigado el papel de los hongos micorrícicos arbusculares como estrategia alternativa para mejorar la productividad agrícola.

En cuanto a la remediación de suelos contaminados, Ambaye et al. (2024) han propuesto tecnologías emergentes para eliminar pesticidas de suelos agrícolas y reutilizarlos de manera segura. De manera similar, Navarro-Torre et al. (2023) han examinado el manejo sostenible de suelos salinos en regiones mediterráneas mediante el uso de halófitas y tecnologías basadas en microorganismos. Yuvaraj et al. (2021) han abordado la importancia del vermicompostaje con desechos sólidos de ganado como una estrategia para la recuperación de recursos y la sostenibilidad agrícola. ha sido ampliamente discutido. Abdul-Majid et al. (2024) han realizado una revisión sistemática sobre el impacto de la adopción tecnológica en el bienestar de los agricultores. Asimismo, Osrof et al. (2023) han analizado cómo las tecnologías de agricultura inteligente pueden optimizar las operaciones agrícolas, mientras que Abiri et al. (2023) han explorado cómo la digitalización contribuye a la productividad del sector. En un contexto similar, Carrer et al. (2022) han evaluado la eficiencia técnica en los cultivos de caña de azúcar mediante la adopción de agricultura de precisión.

Desde una perspectiva de sostenibilidad y cambio estructural, Sharma et al. (2024) han propuesto la agricultura regenerativa combinada con tecnologías digitales como un modelo para transformar la producción agrícola en la India. Kenenbayev et al. (2024) han planteado la agricultura verde sin productos químicos en Kazajistán, destacando la viabilidad de sistemas agrícolas libres de agroquímicos. De manera complementaria, Pergner y Lippert (2023) han analizado los factores que motivan el uso de pesticidas y han propuesto sistemas de cultivo que los sustituyan con fertilizantes minerales.

Por otro lado, el estudio de la adopción tecnológica y su impacto en diferentes regiones también ha sido un tema clave. Schnack et al. (2024) han evaluado la disposición de distintos grupos de consumidores para adoptar tecnologías agrícolas sostenibles, mientras que Rakholia et al. (2024) han desarrollado un estudio piloto sobre la adopción de tecnologías emergentes en la India. En el contexto de América Latina, Amaro-Rosales y de Gortari-Rabiela (2016) han investigado la innovación inclusiva en la producción de café en México, subrayando la importancia de adaptar las tecnologías a pequeños productores.

1.3.3.3. Organismos Genéticamente Modificados. La adopción de cultivos genéticamente modificados (GM) ha generado avances significativos en la producción agrícola, especialmente en la reducción del uso de plaguicidas y en la mejora de la eficiencia en el manejo de plagas y malezas. Desde su introducción comercial en la década de 1990, los cultivos GM han permitido a los agricultores mejorar el control de plagas mediante la incorporación de resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas, lo que ha reducido la dependencia de agroquímicos y su impacto ambiental (*Barrows, Sexton, & Zilberman, 2014*).

Uno de los principales beneficios observados con la adopción de cultivos GM es la disminución en la aplicación de plaguicidas. Se estima que, a nivel mundial, el uso de variedades transgénicas de soja, colza, algodón y maíz permitió reducir en 22,3 millones de kg la cantidad de plaguicidas formulados en el año 2000. Además, si el 50% del maíz, la colza, la remolacha azucarera y el algodón cultivados en la Unión Europea fueran variedades GM, se proyecta una reducción de 14,5 millones de kg anuales en el uso de estos productos, lo que implicaría también una disminución en la cantidad de hectáreas pulverizadas, en el consumo de diésel y en las emisiones de dióxido de carbono (*Phipps & Park, 2002*).

En Estados Unidos, donde los cultivos GM han reemplazado en gran medida a las variedades convencionales, se ha observado una tendencia a la baja en la aplicación de insecticidas en cultivos como maíz y algodón, gracias a la introducción de variedades con resistencia a insectos. En el caso del maíz, la tasa anual de aplicación de herbicidas ha disminuido significativamente desde la adopción de estas tecnologías, aunque en la soja el uso de herbicidas ha aumentado debido a la evolución de malezas resistentes (*Coupe & Capel, 2016*).

Los efectos positivos de los cultivos GM no se limitan solo a la reducción de plaguicidas. También han facilitado cambios en las prácticas de labranza y en el uso de combustibles, lo que

ha contribuido a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En 2015, se estimó que la adopción de cultivos GM con resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas permitió una reducción total de 618,7 millones de kg en la aplicación de plaguicidas, lo que representó una disminución del 8,1% en su uso global. Como consecuencia, el impacto ambiental asociado con estos productos se redujo en un 18,6%, según el indicador *Environmental Impact Quotient* (EIQ). Además, estos cambios en el manejo agrícola resultaron en una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero equivalente a retirar 11,9 millones de automóviles de las carreteras (Brimner, Gallivan, & Stephenson, 2017)

El impacto positivo de los cultivos GM en la agricultura también se refleja en el aumento de los rendimientos y la reducción de costos de producción. Se ha documentado que la adopción de cultivos transgénicos ha permitido incrementar la productividad agrícola al reducir las pérdidas causadas por plagas y enfermedades, optimizando así el uso de los recursos disponibles. Hasta la fecha, se han aprobado alrededor de 525 eventos transgénicos en 32 cultivos distintos en diversas partes del mundo, lo que ha permitido una mayor estabilidad en la producción y una disminución de los costos asociados a la compra y aplicación de plaguicidas (Kumar, y otros, 2020).

2. Discusión

2.1. Nuevas tecnologías clave para la sostenibilidad agrícola: Reducción de plaguicidas y protección ambiental y de la salud

En la agricultura, los nuevos métodos tecnológicos están alterando la forma en que se manejan los efectos de los pesticidas en las personas y la naturaleza. Estos avances no solo minimizan el uso de químicos dañinos, sino que también mejoran el manejo de plagas y agilizan los procesos de producción.

Desde una perspectiva epistemológica, la investigación consultada proviene de enfoques que integran la Ingeniería Agrícola, la Biotecnología y la Salud Pública. Estas investigaciones se han basado en muestras documentales que incluyen estudios de casos de países en desarrollo y desarrollados e informes de instituciones internacionales.

Con respecto al enfoque de ingeniería agrícola, se dedica a aplicar ciencia y tecnología para optimizar los procesos en el sector agrícola. Actualmente, la integración de diversas innovaciones tecnológicas está impulsando el desarrollo de métodos de cultivo más eficientes y sostenibles, reduciendo la dependencia de plaguicidas y minimizando el impacto ambiental. Como es el caso de la empresa SpectralGeo, en conjunto con el Consejo Regulador de la Denominación de Origen Calificada (DOCa) Rioja, ha implementado la inteligencia artificial y datos satelitales para estimar plagas con alta precisión. Gracias a este sistema, la gestión de tratamiento fitosanitarios se ha vuelto mas eficiente, disminuyendo el uso excesivo de plaguicidas y optimizando la producción vinícola. En la actualidad, permite el monitoreo de 65.000 hectáreas y 190.000 parcelas, impulsando prácticas agrícolas más sostenibles.

Además, iniciativas como la de MagTech están revolucionando la agricultura con el desarrollo de cultivo hidropónico de algodón, una técnica que no requiere suelo y utiliza sustratos como fibra de coco o agua. Este método reduce el consumo de agua en más del 50% en comparación con las técnicas tradicionales y elimina la necesidad de plaguicidas químicos, ya que el entorno controlado evita la proliferación de plagas (Valenciano, 2025).

Por otro lado, la instalación de paneles solares en plantaciones ha demostrado un impacto positivo en la biodiversidad agrícola. En un estudio realizado a lo largo de cinco años, se observó un aumento significativo en la población de abejas, gracias a que los paneles solares crean zonas

de sombra que reducen la evaporación del agua y protegen los cultivos del calor. Esto no solo favorece la repoblación de polinizadores, esenciales para la agricultura, sino que también reduce la dependencia de pesticidas al mejorar la resiliencia de los ecosistemas agrícolas (HuffPost, 2024).

La incorporación de tecnologías avanzadas en la agricultura ha generado un impacto significativo en la optimización de los recursos y en la reducción del impacto ambiental. Entre las herramientas especializadas, la agricultura de precisión se destaca por su capacidad para monitorear en tiempo real las condiciones del suelo y de los cultivos mediante el uso de GPS y sensores. Esta tecnología permite identificar zonas específicas que requieren atención, lo que minimiza la aplicación innecesaria de pesticidas y protege otras áreas donde las plantas crecen (Ovalle Másmela, Romero-Perdomo, & Uribe Galvis, 2023). En este sentido, la reducción del uso de productos químicos se convierte en un beneficio clave para la sostenibilidad ambiental.

Por otro lado, la agricultura digital ha revolucionado la gestión agrícola mediante el uso de tecnologías digitales, máquinas de vectores de soporte y árboles de decisión. Estas herramientas permiten analizar diversas variables como la exposición solar, la humedad y la temperatura, facilitando la toma de decisiones informadas y en tiempo real para optimizar los recursos disponibles (Abdul-Majid, Zahari, Othman, & Nadzri, 2024). No obstante, la implementación de estas tecnologías aún enfrenta retos importantes, especialmente en países en desarrollo, donde la infraestructura y el apoyo económico pueden ser insuficientes (Zaman, 2023).

Desde otra perspectiva, la biotecnología ha desempeñado un papel fundamental en la protección de los cultivos frente a plagas y enfermedades. El uso de microorganismos como hongos, bacterias, virus y protozoos ha demostrado ser una estrategia eficaz para el control biológico de enfermedades, reduciendo la dependencia de pesticidas químicos (Agüero, 2022). Además, la biorremediación representa una solución innovadora al permitir que ciertos microorganismos descompongan los pesticidas en compuestos más simples y menos tóxicos, contribuyendo así a la descontaminación del suelo (Gebregiorgis et al., 2024).

Adicionalmente, la biotecnología promueve el uso de biofertilizantes y abonos biológicos que mejoran la nutrición y el crecimiento de las plantas. Estos productos, derivados de microorganismos beneficiosos, ofrecen una alternativa sostenible y ecológica a los fertilizantes convencionales (Singh et al., 2024). Sin embargo, la adopción de estos métodos a gran escala requiere superar barreras técnicas y económicas, lo que plantea la necesidad de un mayor respaldo gubernamental y privado.

El análisis de los estudios revisados muestra un acuerdo general sobre el daño que causan los plaguicidas y la necesidad de tecnologías que puedan reducir su uso, así mismo, se hace énfasis en el enfoque crítico de repensar el uso de plaguicidas desde una perspectiva ética, tal como proponen los autores Cai et al (2021) indicando que el desarrollo tecnológico no solo debe limitarse a aumentar la productividad, sino también a proteger los recursos naturales y mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales; esta visión ético-sostenible de la tecnología en la agricultura requiere un replanteamiento profundo de las prácticas actuales. También se resalta de manera significativa el acceso desigual a la tecnología, lo cual implica que es fundamental contar con políticas públicas que aseguren que las personas tengan acceso y reciban capacitación en esta área (Grovermann et al., 2017).

Algunos de los estudios más recientes realizados por Abdul-Majid et al (2024) y Rakholia et al (2024) denominados “influencia de la adopción de tecnología en el bienestar de los agricultores: revisión sistemática de la literatura y análisis bibliométrico” y “Adopción de tecnologías emergentes para la agricultura sostenible en la India: un estudio piloto” destacan que se debe aprovechar la tecnología. Por ejemplo, los biopesticidas, los sensores inteligentes, los drones y las plataformas de agricultura de precisión son probablemente los más eficaces en el control y eficientes en su aplicación (Abdul-Majid et al., 2024). Estas tecnologías ayudan a aplicar la cantidad adecuada de producto, evitando aplicaciones fuertes que carecen de efecto además de causar daños ambientales.

A partir del análisis de los estudios revisados, se observa que la biotecnología agrícola está evolucionando hacia un modelo más integrado donde los biopesticidas, los fertilizantes biológicos y las tecnologías de biorremediación juegan un papel clave en la reducción de plaguicidas sintéticos. Estas tecnologías no solo buscan mitigar el impacto ambiental de la agricultura intensiva, sino que también apuntan a mejorar la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático y la degradación del suelo. De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la adopción de estas innovaciones es clave para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo referente a la producción responsable y la salud ambiental. Sin embargo, su implementación aún enfrenta barreras económicas y regulatorias, lo que indica la necesidad de políticas públicas que incentiven su adopción a gran escala.

2.2. Beneficios al medio ambiente y a la salud al usar las nuevas tecnologías en el sector agrícola

La sustitución de pesticidas químicos por biopesticidas basados en componentes orgánicos emerge como una opción más segura para la humanidad y su entorno ya que diferentes autores como Bhoi et al (2022) dejan ver que los biopesticidas derivados de materiales naturales como plantas, bacterias y minerales ofrecen un método de control de plagas más amigable con el medio ambiente. Además, Su adopción podría reducir la contaminación del suelo, el agua y el aire asociada con los pesticidas sintéticos, al tiempo que disminuye los riesgos para la salud de los agricultores y consumidores. En consecuencia, los sistemas de apoyo a la decisión han demostrado ser herramientas clave para optimizar el uso de insumos agrícolas. Estos sistemas incluyen modelos predictivos de enfermedades y plagas, sensores de monitoreo de cultivos, imágenes satelitales y drones, sistemas de información geográfica (SIG) y software de gestión agrícola. Gracias a estos enfoques es posible reducir el uso de fungicidas hasta el 50% en comparación con las estrategias de aplicación rutinaria en intervalos fijos, sin aumentar el riesgo de enfermedades en los cultivos. Su implementación respalda prácticas como la agricultura de precisión y la agroecología, las cuales no solo contribuyen a la reducción de insumos químicos, sino que también fomentan la biodiversidad y minimizan los impactos negativos en la salud humana y ambiental (Brunelle et al., 2024).

En India y Ecuador, las investigaciones realizadas ofrecen numerosos beneficios para los agricultores, el medio ambiente y la sociedad; la mejora de la salud y fertilidad del suelo conducen a una mayor producción agrícola por medio de la agricultura regenerativa ya que según lo estudiado esta promete también capturar cantidades significativas de carbono del aire y lo almacena en el suelo, contribuyendo de este modo a la mitigación del cambio climático, adicionalmente, aumenta la capacidad de la tierra para filtrar y retener agua, haciendo que las granjas y comunidades sean más resilientes a inundaciones y sequías, al tiempo que reduce la erosión y la escorrentía tóxica (Coque, 2024).

Otro rasgo de la agricultura regenerativa es que produce alimentos ricos en nutrientes libres de toxinas químicas; aumenta la disponibilidad de nutrientes para las plantas y las defiende naturalmente contra plagas, reduciendo la necesidad de costosos fertilizantes químicos y

pesticidas; y mejora el hábitat para la vida silvestre y la biodiversidad en los ecosistemas, aumentando su robustez (Sharma et al., 2024).

Desde otro punto de vista, la educación juega un papel importante en la implementación de las tecnologías y la reducción del uso de plaguicidas, por lo que se deberían implementar más programas educativos para prevenir que los agricultores usen en exceso plaguicidas y fertilizantes nitrogenados. La mejora los servicios de extensión rural y las demostraciones in situ beneficiaría a los agricultores al proporcionarles conocimientos sobre la calidad del suelo y generaría conciencia sobre los efectos negativos del uso excesivo de fertilizantes (Zhou et al., 2010).

Al mismo tiempo, las tecnologías innovadoras desarrolladas en los Science and Technology Backyards (STBs) han demostrado beneficios para el medio ambiente y la producción agrícola sostenible, denotando que la utilización de estas tecnologías no solo mejora la productividad, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental al mantener los niveles de insumos químicos (Li et al., 2014).

2.3. Desafíos y perspectivas de las tecnologías agrícolas para reducir plaguicidas y promover la salud pública

Las prácticas agrícolas sostenibles e innovadoras han demostrado tener impactos diversos en el bienestar de los agricultores. Mientras que la mayoría de los estudios indican que la adopción de nuevas tecnologías mejora la productividad y los ingresos, estas mejoras no siempre se traducen en una percepción positiva de la calidad de vida de los productores. La efectividad de las innovaciones tecnológicas está condicionada por su compatibilidad con las prácticas agrícolas locales y por la capacidad de los agricultores para adaptarse a ellas.

A pesar del potencial de las tecnologías agrícolas para reducir el uso de plaguicidas y mejorar la sostenibilidad, su implementación enfrenta numerosos desafíos. La adaptabilidad de las soluciones tecnológicas y su aceptación por parte de los agricultores continúan siendo barreras clave. En este sentido, investigaciones futuras deben abordar el impacto de estas tecnologías desde una perspectiva integral, considerando no solo la productividad y los ingresos, sino también factores sociales y ambientales. Un enfoque de métodos mixtos, que combine análisis cuantitativos y cualitativos, permitiría comprender mejor los efectos de estas innovaciones en el bienestar de los agricultores (Abdul-Majid, Zahari, Othman, & Nadzri, 2024).

La reducción del uso de plaguicidas en la agricultura exige un enfoque integral que combine innovación y equidad en su implementación. Entre las oportunidades disponibles, destacan el desarrollo de variedades resistentes a plagas mediante injertos y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, que evidencian el potencial de las nuevas tecnologías. Sin embargo, la adopción generalizada de estas prácticas se ve obstaculizada por la falta de capacitación y la necesidad de inversión en investigación y desarrollo. La sustitución progresiva de agroquímicos por fertilizantes orgánicos representa una alternativa prometedora, pero requiere un compromiso a largo plazo que considere factores económicos, sociales y ambientales (Amaro-Rosales & de Gortari-Rabiela, 2023).

El grado de adopción de tecnologías agrícolas varía considerablemente entre regiones. En India, la implementación de tecnologías emergentes se ve limitada por la alta inversión inicial, la falta de conciencia sobre sus beneficios y la baja capacidad de los agricultores para asumir riesgos. Soluciones como el uso de drones, la hidroponía y la agricultura vertical, a pesar de su potencial para optimizar recursos y reducir la dependencia de plaguicidas, han mostrado tasas de no adopción del 100% en los cultivos estudiados (Rakholia, Tailor, Prajapati, Shah, & Saini, 2024). En contraste, en Tanzania, los programas de extensión agrícola basados en la capacitación entre agricultores han resultado en un aumento significativo del rendimiento de los cultivos, facilitado por redes sociales y geográficas que promueven la adopción de innovaciones (Nakano, Tsusaka, Aida, & Pede, 2018).

Estos ejemplos evidencian que la transición hacia una agricultura más sostenible y menos dependiente de plaguicidas no solo depende del desarrollo de nuevas tecnologías, sino también de estrategias adecuadas para su difusión, financiamiento y aceptación por parte de los agricultores. La combinación de enfoques tecnológicos y sociales será clave para garantizar el éxito de estas innovaciones en la reducción del impacto ambiental y la promoción de la salud pública.

Es relevante destacar que ambos estudios resaltan la importancia de abordar las barreras que limitan la adopción de tecnologías agrícolas innovadoras. Mientras que en India los principales desafíos radican en los costos iniciales y la falta de concienciación, el caso de Tanzania muestra que los métodos de difusión basados en la comunidad pueden facilitar significativamente la adopción de nuevas prácticas. Estos contrastes sugieren que una estrategia efectiva para promover una agricultura más sostenible y productiva en países en desarrollo no debe centrarse únicamente en la disponibilidad de tecnología, sino también en la superación de obstáculos financieros y

sociales. La combinación de incentivos económicos con programas de capacitación y redes comunitarias podría desempeñar un papel clave en la expansión de soluciones innovadoras y en la reducción de la dependencia de plaguicidas.

Desde la perspectiva de la salud pública, la revisión documental evidencia que uno de los principales problemas de la agricultura actual es su insostenibilidad, especialmente debido al uso intensivo de plaguicidas. Estos compuestos representan un riesgo significativo tanto para el medio ambiente como para la salud humana (Ansari, y otros, 2024). Su impacto va más allá del control de plagas, afectando a especies no objetivo y alterando ecosistemas, lo que compromete la calidad del aire, el agua y el suelo. Además, los plaguicidas modifican las propiedades del suelo, afectando su microbiota y reduciendo su fertilidad, lo que repercute en la productividad agrícola y en los servicios ecosistémicos.

Investigaciones recientes sugieren que la degradación ambiental causada por los plaguicidas puede revertirse mediante la adopción de prácticas agrícolas sostenibles. Estrategias como la agricultura orgánica, el uso de variedades resistentes a plagas y técnicas de biorremediación han demostrado su potencial para restaurar la calidad del suelo y reducir la dependencia de plaguicidas (Zhou, Yang, Mosler, & Abbaspour, 2010). Ante estos desafíos, el desarrollo e implementación de tecnologías agrícolas innovadoras se presentan como una alternativa clave para minimizar el uso de plaguicidas sin comprometer la productividad.

En general, se observa un consenso en que la biotecnología tiene un alto potencial para reducir el uso de plaguicidas y fertilizantes sintéticos, contribuyendo a una agricultura más sostenible. Sin embargo, algunos autores como Pergner & Lippert (2023) advierten que la adopción de estas tecnologías aún enfrenta barreras económicas y de acceso, especialmente en países en desarrollo, donde la inversión en investigación y desarrollo sigue siendo limitada. Por ello, resulta fundamental diseñar estrategias que combinen incentivos financieros, capacitación y acceso equitativo a las tecnologías, garantizando su implementación efectiva y su impacto positivo en la salud pública y el medio ambiente.

Conclusiones

Las nuevas tecnologías agrícolas continúan evolucionando con el objetivo de minimizar los impactos negativos que los plaguicidas generan en la salud humana y el medio ambiente. La revisión de estas innovaciones destaca la aplicación de recursos de origen biológico, la agricultura de precisión y el uso de drones, sensores inteligentes e inteligencia artificial como herramientas clave para garantizar un control más eficiente y sostenible de las plagas. Estos avances reflejan una transformación en la manera en que se manejan los cultivos, reduciendo progresivamente la dependencia de los plaguicidas sintéticos y sus efectos adversos en los ecosistemas.

El impacto positivo de estas tecnologías ya es evidente en algunas regiones. Estudios recientes han demostrado que la adopción de estas soluciones ha permitido reducir la exposición a productos químicos hasta en un 90%, disminuyendo así los riesgos para la salud humana y mejorando la calidad del suelo y los cuerpos de agua cercanos a las zonas agrícolas. Sin embargo, a pesar de los beneficios comprobados, los niveles de adopción siguen siendo desiguales, especialmente en países en desarrollo donde las barreras económicas y tecnológicas limitan la implementación de estas herramientas.

Entre los enfoques revisados, la agricultura de precisión es el que ha logrado mayor grado de implementación gracias a la integración de sensores, sistemas automatizados y drones que optimizan la aplicación de insumos agrícolas. No obstante, su accesibilidad sigue siendo un desafío, ya que su implementación requiere inversiones significativas en infraestructura tecnológica y capacitación especializada.

Por otro lado, la biotecnología agrícola es el campo con mayor proyección en términos de innovación y sostenibilidad a largo plazo. El desarrollo de biopesticidas, biofertilizantes y microorganismos benéficos ha demostrado ser una alternativa viable para reemplazar los agroquímicos tradicionales. Sin embargo, su adopción depende en gran medida de regulaciones gubernamentales y de incentivos económicos para la investigación, lo que ha frenado su expansión en algunas regiones.

Las tecnologías digitales y la automatización representan un área de rápido crecimiento, con la implementación de modelos predictivos, big data y herramientas de inteligencia artificial para mejorar la detección temprana de plagas y optimizar la toma de decisiones en el manejo

agrícola. Estas innovaciones tienen el potencial de transformar el sector, pero aún enfrentan barreras relacionadas con la disponibilidad de datos y la conectividad en zonas rurales.

Las regulaciones y políticas públicas juegan un papel crucial en la reducción del uso de plaguicidas. Los países que han establecido normativas estrictas han facilitado la transición hacia modelos agrícolas más sostenibles, mientras que en otras regiones la falta de regulaciones ha perpetuado el uso excesivo de agroquímicos. No obstante, las políticas por sí solas no son suficientes; es necesario un enfoque integral que combine incentivos financieros, formación técnica para los productores y mayor inversión en investigación y desarrollo.

Finalmente, los hallazgos revisados indican que la adopción de estas tecnologías no solo depende de su disponibilidad, sino también de la interacción entre factores económicos, políticos y sociales. Mientras que la agricultura de precisión se posiciona como la tecnología con mayor aplicación en el presente, la biotecnología y la automatización digital representan el futuro de la reducción del uso de plaguicidas. Lograr una transición efectiva hacia una agricultura sostenible requerirá un esfuerzo coordinado entre el sector público, el sector privado y los propios productores para garantizar el acceso equitativo a estas innovaciones y maximizar sus beneficios ambientales y para la salud humana.

Recomendaciones

Para lograr una reducción efectiva en el uso de plaguicidas y promover la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles, es necesario fortalecer las políticas públicas que faciliten el acceso equitativo a estas innovaciones. La implementación de incentivos económicos, como subsidios y créditos, junto con programas de capacitación técnica, permitiría que tanto pequeños como medianos productores adopten herramientas como la biotecnología y la agricultura de precisión. Sin estos incentivos, la brecha tecnológica entre los grandes productores y los agricultores de menor escala seguirá ampliándose, limitando el impacto de estas tecnologías en la sostenibilidad agrícola.

Asimismo, es fundamental aumentar la inversión en investigación y desarrollo para adaptar estas tecnologías a distintos entornos agrícolas. La mayoría de las innovaciones han sido diseñadas para regiones con alta infraestructura tecnológica, lo que dificulta su aplicación en áreas rurales con menor acceso a estos recursos. La generación de versiones accesibles de estas herramientas, considerando la disponibilidad de insumos locales y las capacidades técnicas de los agricultores, facilitaría su implementación en una mayor variedad de contextos productivos.

Otro aspecto clave es la capacitación y educación continua de los agricultores sobre el uso y mantenimiento de estas tecnologías. La falta de conocimientos técnicos ha sido identificada como una de las principales barreras para la adopción de herramientas como los biopesticidas y la inteligencia artificial aplicada al monitoreo de cultivos. La creación de programas de formación en universidades, institutos agropecuarios y asociaciones de productores garantizaría un uso eficiente y seguro de estas innovaciones, maximizando sus beneficios en términos de productividad y reducción de impacto ambiental.

También es necesario evaluar la sostenibilidad a largo plazo de tecnologías como los organismos genéticamente modificados (OGM). Aunque han demostrado ser eficaces en la reducción del uso de plaguicidas, persisten preocupaciones sobre sus efectos ecológicos y su aceptación social. Por ello, es fundamental que futuras investigaciones incluyan estudios integrales de impacto ambiental y social, con el fin de determinar de manera precisa los riesgos y beneficios de su implementación en diversos sistemas productivos.

Finalmente, es imprescindible fortalecer las estrategias de monitoreo y control del uso de plaguicidas mediante el uso de tecnologías digitales. La falta de seguimiento sobre la aplicación

de agroquímicos sigue siendo un problema en muchas regiones, lo que impide la implementación efectiva de estrategias de reducción. La integración de plataformas digitales que permitan a los productores registrar y monitorear su uso facilitaría la transición hacia modelos agrícolas más sostenibles, promoviendo un manejo más responsable de estos insumos. Solo a través de un enfoque integral que combine la innovación tecnológica con políticas públicas, capacitación técnica e incentivos económicos, será posible consolidar una agricultura más sostenible y reducir la dependencia de los plaguicidas sintéticos.

Referencias Bibliográficas

- Bascope Zañabria, R., Bickel, U., & Jacobi, J. (11 de 2019). Plaguicidas químicos usados en el cultivo de soya en el Departamento de Santa Cruz, Bolivia: riesgos para la salud humana y toxicidad ambiental. *Acta Nova*, 3, 386 - 416. doi:<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000507623>
- Abderahman, R., Alireza, A., Karim, R., & Horst, T. (07 de 2022). *Computers and Electronics in Agriculture*. doi:10.1016/j.compag.2022.107017
- Abdul-Majid, M., Zahari, S., Othman, N., & Nadzri, S. (01 de 2024). Influence of technology adoption on farmers' well-being: Systematic literature review and bibliometric analysis. *Heliyon*, 10(2). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e24316
- Aggelopoulou, K., Pateras, D., Fountas, S., Gemtos, T., & Nanos, G. (02 de 2011). Soil spatial variability and site-specific fertilization maps in an apple orchard. *Precision Agriculture*, 12. doi:10.1007/s11119-010-9161-x
- Ahmed, A., Sara Taha, A., Sundas Rana, Q., & Man Qun, W. (01 de 03 de 2021). *Toxics*. doi:10.3390/toxics9030042
- Amaro-Rosales, M., & de Gortari-Rabiela, R. (09 de 2023). Innovación inclusiva en el sector agrícola mexicano: los productores de café en Veracruz. *Economía Informa*, 400, 86-104. doi:10.1016/j.ecin.2016.09.006
- Ansari, I., El-Kady, M., El Din Mahmoud, A., Arora, C., Verma, A., Rajarathinam, R., . . . Mittal, J. (01 de 2024). Persistent pesticides: Accumulation, health risk assessment, management and remediation: An overview. *Desalination and Water Treatment*, 317. doi:10.1016/j.dwt.2024.100274
- Asiamah, J. Y., Tachie Menson, J. W., Agyirifo, D. S., Agbeko, R., & Essem, F. (2020). *University of Cape Coast, Department of Crop Science, Cape Coast, Ghana*. Obtenido de <https://research-ebsco-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/c/3zzo4a/viewer/pdf/765tzvnfsv>
- Barrows, G., Sexton, S., & Zilberman, D. (12 de 2014). Agricultural biotechnology: The promise and prospects of genetically modified crops. *Journal of Economic Perspectives*, 28. doi:10.1257/jep.28.1.99

- Bhoi, R., Mahananda, M., & Pradhan, A. (12 de 2022). Human health risk assessment of pesticides used for rice cultivation in an agricultural pockets of Eastern India. *Environmental Quality Management*, 32. doi:10.1002/tqem.21908
- Bramer, W., Rethlefsen, M., Kleijnen, J., & Franco, O. (12 de 2017). Optimal database combinations for literature searches in systematic reviews: A prospective exploratory study. *Systematic Reviews*, 6(1), 245. doi:10.1186/s13643-017-0644-y
- Brimner, T., Gallivan, G., & Stephenson, G. (2017). Influence of herbicide-resistant canola on the environmental impact of weed management. *Pest Management Science*, 61. doi:10.1002/ps.967
- Brunelle, T., Chakir, R., Carpentier, A., Dorin, B., Goll, D., Guilpart, N., . . . Tang, F. (12 de 2024). Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change. *Communications Earth and Environment*, 5. doi:10.1038/s43247-024-01533-1
- Cai, J., Xiong, J., Hong, Y., & Hu, R. (09 de 2021). Pesticide overuse in apple production and its socioeconomic determinants: Evidence from Shaanxi and Shandong provinces, China. *Journal of Cleaner Production*, 315. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128179
- Carrer, M., de Souza Filho, H., & Batalha, M. (06 de 2017). Factors influencing the adoption of Farm Management Information Systems (FMIS) by Brazilian citrus farmers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138. doi:10.1016/j.compag.2017.04.004
- Carrer, M., Filho, H., Vinholis, M., & Mozambani, C. (04 de 2022). Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*, 177. doi:10.1016/j.techfore.2022.121510
- Coque Acosta, E. P. (2024). *Estudiar los impactos en la salud debido a la exposición de los órganos fosforados en los trabajadores agrícolas del GADPC*. [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica Indoamérica]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/6901/1/COQUE%20ACOSTA%20EDISON%20PAUL.pdf>
- Coupe, R., & Capel, P. (2016). Trends in pesticide use on soybean, corn and cotton since the introduction of major genetically modified crops in the United States. *Pest Management Science*, 72. doi:10.1002/ps.4082
- Cropin. (2021). *Farming Apps- Why are they vital to present-day Crop Production?*. Obtenido de <https://www.cropin.com/precision-agriculture>

- de los Ángeles Mazo, N., & Rubiano, J. E. (15 de 06 de 2015). *Universidad del Valle, Cali*.
Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/62665/41993-282937-2-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Emerging Agricultural Technologies Working Group. (2021). *Emerging Agricultural Technologies Working Group*. Obtenido de <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-10/emerging-agricultural-technologies-workgroup-report-and-recommendations-for-ppdc-review.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/agriculture/ippm/activities/pesticide-risk-reduction/en/>
- García, E., & Flego, F. (2024). Agricultura de Precisión. Obtenido de <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Garza-Sánchez, J., Coronado-Blanco, J., Rodríguez-Del-Bosque, L., Osorio-Hernández, E., Estrada-Drouaillet, B., & Ivanovich Khalaim, A. (2023). El control biológico en la educación agrícola: una alternativa sustentable. doi:<https://doi.org/10.30973/aap/2023.9.0091016>
- Grovermann, C., Schreinemachers, P., Riwthong, S., & Berger, T. (02 de 2027). ‘Smart’ policies to reduce pesticide use and avoid income trade-offs: An agent-based model applied to Thai agriculture. *Ecological Economics*, 132. doi:10.1016/j.ecolecon.2016.09.031
- Hidalgo, L. (2017). *La situación actual de la sustitución de insumos agroquímicos por productos biológicos como estrategia en la producción agrícola: El sector frutícola ecuatoriano*. [Trabajo de grado, Universidad Andina Simón Bolívar]. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10644/6095>
- Hladik, M., Main, A., & Goulson, D. (03 de 2018). *Environmental Science and Technology*. doi:10.1021/acs.est.7b06388
- Howard, A., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., . . . Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. Obtenido de <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1143326/full>
- HuffPost. (09 de 10 de 2024). *Instalan paneles solares en dos plantaciones y 5 años después se convierte en el paraíso de la abejas*. Obtenido de Huffingtonpost:

- <https://www.huffingtonpost.es/tecnologia/instalan-paneles-solares-dos-plantaciones-5-anos-convierte-paraiso-abejas.html>
- Jiao, X., Zhang, H., Ma, W., Wang, C., Li, X., & Zhang, F. (2019). Science and Technology Backyard: A novel approach to empower smallholder farmers for sustainable intensification of agriculture in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(8), 1657-1666. doi:10.1016/S2095-3119(19)62592-X
- JRC . (04 de 07 de 2024). *JRC news and updates*, Reducing pesticide use: more data and innovative solutions needed. Obtenido de https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/reducing-pesticide-use-more-data-and-innovative-solutions-needed-2024-07-04_en
- Kenenbayev S, Yessenbayeva G, Zhanbyrbayev Y, & Tabynbayeva I. (2024). *Society for the Advancement of Breeding Research in Asia and Oceania*. Obtenido de <https://research.ebsco-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/c/3zzo4a/viewer/pdf/bjgghojeq5>
- Klerkx, L., & Rose, D. (03 de 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. doi:10.1016/j.gfs.2019.100347
- Kumar, K., Gambhir, G., Dass, A., Tripathi, A., Singh, A., Jha, A., . . . Rakshit, S. (04 de 2020). Genetically modified crops: current status and future prospects. *Planta*, 251. doi:10.1007/s00425-020-03372-8
- Lamichhane, J., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., & Messéan, A. (15 de 01 de 15 de 01 de 2016). Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. *Plant Disease*, 100, 10-24. Obtenido de <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-15-0574-FE>
- Ma, L., Feng, S., Reidsma, P., Qu, F., & Heerink, N. (03 de 2014). Identifying entry points to improve fertilizer use efficiency in Taihu Basin, China. *Land Use Policy*, 37, 52-59. doi:10.1016/j.landusepol.2013.01.008
- Márquez Lara, D. (2008). *Ciencia y tecnología Agropecuaria*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945024014.pdf>
- Mateu Tortosa , E. (1993). *Agricultura y Sociedad*. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_ays/a066_02.pdf
- Mejía Montoya, L., & Hernández Cifuentes, C. (2021). *Formulación de medidas de prevención y control frente al riesgo químico para trabajadores de fincas cafeteras en Colombia*.

- Unidad central del Valle del Cauca. [Trabajo de grado, Unidad central del Valle del Cauca]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.uceva.edu.co/bitstream/handle/20.500.12993/3888/T00032027.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Möhring, N., Gaba, S., & Finger, R. (2019). Quantity based indicators fail to identify extreme pesticide risks. *I*, 503-523. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.287
- Mora Villar, D., & Mateluna Hernández, N. (2021). *Plan de adopción de nuevas tecnologías en producción agrícola para pequeños y medianos agricultores de la región del Maule*. Universidad de Talca, Facultad de Economía y Negocios, Talca-Chile. Obtenido de <http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/13200/3/2021A001049.pdf>
- Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2017). Pesticides: an update of human exposure and toxicity. *Archives of Toxicology*, 91(2), 549-599. doi:10.1007/s00204-016-1849-x
- Nakano, Y., Tsusaka, T., Aida, T., & Pede, V. (05 de 2018). Is farmer-to-farmer extension effective? The impact of training on technology adoption and rice farming productivity in Tanzania. *World Development*, 105, 336-351. doi:10.1016/j.worlddev.2017.12.013
- Ostos Ortiz, O. (2024). Edición genética e inteligencia artificial: Desafíos éticos frente a los avances biotecnológicos. *NOVA*, 23. doi:10.22490/24629448.8770
- Ovalle Másmela, J. C., Romero-Perdomo, F., & Uribe Galvis, C. (2023). Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia. doi:10.21930/agrosavia.estudiodevigilancia.2023.2
- Phipps, R., & Park, J. (2002). Environmental benefits of genetically modified crops: Global and European perspectives on their ability to reduce pesticide use. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 11. doi:10.22358/jafs/67788/2002
- Pivoto, D., Waquil, P., Talamini, E., Finocchio, C., Dalla Corte, V., & de Vargas Mores, G. (03 de 2018). Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. *Information Processing in Agriculture*, 5. doi:10.1016/j.inpa.2017.12.002
- Qayyum, M., Zhang, Y., Wang, M., Yu, Y., Li, S., Ahmad, W., . . . Gan, J. (12 de 2023). Advancements in technology and innovation for sustainable agriculture: Understanding and mitigating greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Journal of Environmental Management*, 347. doi:10.1016/j.jenvman.2023.119147

- Rakholia, R., Tailor, J., Prajapati, M., Shah, M., & Saini, J. (09 de 2024). Emerging technology adoption for sustainable agriculture in India– a pilot study. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17. doi:10.1016/j.jafr.2024.101238
- Ranganathan, J., Waite, R., Searchinger, T., & Zions, J. (12 de 05 de 2020). *Researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/341341914_Regenerative_Agriculture_Good_for_Soil_Health_but_Limited_Potential_to_Mitigate_Climate_Change
- Reyes, P., Oliveros, J., Racedo, C., & Bernal Giraldo, A. (11 de 2024). Uso de la biodiversidad para mejorar la agricultura: tendencias en la investigación y el mercado en biofertilizantes en Colombia. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*. doi:10.53010/nys10.06
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. (04 de 2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. doi:10.1016/j.biocon.2019.01.020
- Schnack, A., Bartsch, F., Osburg, V., & Errmann, A. (11 de 2024). Sustainable agricultural technologies of the future: Determination of adoption readiness for different consumer groups. *Technological Forecasting and Social Change*, 208. doi:10.1016/j.techfore.2024.123697
- Sharma, A., Prakash, A., Bhambota, S., & Kumar, S. (2024). Investigations of precision agriculture technologies with application to developing countries. *Environment, Development and Sustainability*. doi:10.1007/s10668-024-04572-y
- Sharma, C., Pathak, P., Kumar, A., & Gautam, S. (12 de 2024). Sustainable regenerative agriculture allied with digital agri-technologies and future perspectives for transforming Indian agriculture. *Environment, Development and Sustainability*. doi:10.1007/s10668-024-05231-y
- Uzcátegui, J., Araujo, Y., & Mendoza, L. (2011). Residuos de plaguicidas organoclorados y su relación con parámetros físico-químicos en suelos del municipio Pueblo Llano, Estado Mérida. *Bioagro*, 2, 115-120. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612011000200006&lng=es&tlng=es

- Valenciano, G. (2025). *La empresa española que envía algodón hidropónico a las marcas de lujo*. Obtenido de SER: <https://cadenaser.com/nacional/2024/10/28/la-empresa-espanola-que-envia-algodon-hidroponico-a-las-marcas-de-lujo-cadena-ser/>
- Vidya Madhuri, E., Rupali, J., Sharan, S., Sai Pooja, N., Sujatha, G., Singh, D., . . . Prabha, R. (04 de 2025). Transforming Pest Management with Artificial Intelligence Technologies: The Future of Crop Protection. *Journal of Crop Health*, 77. doi:10.1007/s10343-025-01109-9
- Viña, D. (2025). *Inteligencia artificial, imágenes satelitales y datos: la revolución tecnológica del campo*. Obtenido de El País: https://elpais.com/proyecto-tendencias/2025-02-26/inteligencia-artificial-imagenes-satelitales-y-datos-la-revolucion-tecnologica-del-campo.html?utm_source
- Wei, Z., Mengmeng, L., & Varennyam, A. (01 de 2025). *Emerging Contaminants*. doi:10.1016/j.emcon.2024.100410
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. (05 de 2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153. doi:10.1016/j.agsy.2017.01.023
- Yáñez Quijada, A. I., & Camarena Gómez, B. O. (2019). *Sociedad y Ambiente*. Obtenido de <https://revistas.ecosur.mx/sociedadambiente/index.php/sya/article/view/1939/1769>
- Yatribi, T. (09 de 09 de 2020). *Economics*. doi:10.2478/eoik-2020-0013
- Zaman, Q. (2023). Precision agriculture technology: A pathway toward sustainable agriculture. *Precision Agriculture: Evolution, Insights and Emerging Trends*, 1-17. doi:10.1016/B978-0-443-18953-1.00013-1
- Zhou, Y., Yang, H., Mosler, H.-J., & Abbaspour, K. (2010). Factors affecting farmers' decisions on fertilizer use: A case study for the Chaobai watershed in Northern China. *Consilience*, 4, 80–102. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/26167133>