

**Innovaciones tecnológicas para monitorear y predecir el impacto del cambio climático
en el suelo.**

Ana Milena Duran Devia

Diego Fernando García Castañeda

Asesor:

Diana Cristina Medina

Universidad nacional abierta y a distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Programa de Agronomía

2024

Resumen

En la actualidad, el cambio climático representa un conjunto de desafíos para diversos campos sobre todo el de la agricultura, ya que este fenómeno afecta directamente la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, por tal razón, en la siguiente monografía se toma como epicentro esta problemática; el objetivo central de esta es analizar las innovaciones tecnológicas enfocadas en el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo desde una perspectiva agronómica, mediante una metodología de carácter cualitativo, la cual se basó en una revisión sistemática que incluyó en su búsqueda términos como, tecnologías, sensores de humedad y nutrientes, imágenes satelitales, modelos climáticos, monitoreo; dando como resultado que, los sensores de humedad y nutrientes promueven una gestión precisa en cuanto al riego y la fertilización, de la misma manera, los drones y las imágenes satelitales facilitan el monitoreo en tiempo real y ayudan en la detección temprana de riesgos, paralelamente los modelos climáticos y de crecimiento por su parte, colaboran en la planificación a largo plazo y la optimización de las prácticas del agro, también se identificaron limitaciones por factores relacionado con el costo de las tecnologías y el mantenimiento de las mismas; concluyendo que dentro del sector agro es necesario integrar tecnologías que sirvan como mano de obra, ya que estas contribuyen positivamente a la disminución de riesgos, transformando la gestión agronómica del suelo, mejorando la toma de decisiones y adaptándose al clima para un monitoreo efectivo.

Palabras clave: adaptación climática, gestión agronómica, modelos predictivos, monitoreo agronómico, sensores avanzados.

Abstract

Currently, climate change represents a set of challenges for various fields, especially agriculture, since this phenomenon directly affects soil quality and crop yield, for this reason, the following monograph takes this problem as its epicenter; The central objective of this is to analyze the technological innovations focused on monitoring and predicting the impact of climate change on the soil from an agronomic perspective, through a qualitative methodology, which was based on a systematic review that included in its search terms such as technologies, humidity and nutrient sensors, satellite images, climate models, monitoring; resulting in that humidity and nutrient sensors promote precise management in terms of irrigation and fertilization, likewise, drones and satellite images facilitate real-time monitoring and help in the early detection of risks, in parallel, climate and growth models, for their part, collaborate in the long-term planning and optimization of agricultural practices, limitations were also identified due to factors related to the cost of the technologies and their maintenance; concluding that within the agricultural sector it is necessary to integrate technologies that serve as labor, since these contribute positively to risk reduction, transforming agronomic soil management, improving decision-making and climate adaptation for effective monitoring.

Keywords: Climate adaptation, agronomic management, predictive models, agronomic monitoring, advanced sensors.

Tabla de contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Introducción	9
Descripción de problema.....	11
Justificación.....	13
Objetivos	16
Objetivo general	16
Objetivos específico	16
Estado del arte	17
Marco teórico	20
Innovaciones tecnológicas.....	20
Identificación de tecnologías de monitoreo del suelo en agronomía	21
Ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles para el monitoreo del suelo	22
Ventajas.....	23
Limitaciones.....	24
Metodología	26
Método	26
Paradigma.....	27
Fuentes de información	27
Bases de datos y repositorios	27
Criterios de inclusión y exclusión	28
Proceso de búsqueda y selección	29
Estrategia de Búsqueda	29
Selección de estudios	29
Análisis de datos	30
Extracción de información	30

Validación y fiabilidad.....	30
Validación de fuentes.....	30
Limitaciones del estudio.....	31
Elaboración de conclusiones y recomendaciones	31
Síntesis de hallazgos.....	31
Identificación de áreas futuras de investigación.....	32
Resultados	33
Caracterización de los artículos.....	34
Identificación de las principales tecnologías utilizadas en el monitoreo del suelo y otros métodos emergentes.....	38
Tecnologías principales identificadas	38
Ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles.....	42
Recomendaciones prácticas para la aplicación en el ámbito agronómico.....	44
Integración de tecnologías para monitoreo efectivo.....	45
Desarrollo y capacitación en modelos predictivos	45
Optimización de Big Data para toma de decisiones.....	45
Enfoque en seguridad y accesibilidad	46
Investigación y desarrollo continuos.....	46
Conclusiones	47
Recomendaciones.....	49
Apéndices.....	61

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Criterios de inclusión y exclusión</i>	25
Tabla 2 <i>Resumen de los aportes de cada artículo</i>	31
Tabla 3 <i>Tecnologías identificadas principales aspectos</i>	38
Tabla 4 <i>Ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles</i>	39

Lista de figuras

Figura 1 <i>Búsqueda y selección</i>	26
Figura 2 <i>Diagrama de flujo PRISMA</i>	30
Figura 3 <i>Prácticas para la Aplicación en el Ámbito Agronómico</i>	41

Lista de apéndices

Apéndice A *Matriz de Referencias para Tecnologías en el Monitoreo del Suelo.....61*

Introducción

La siguiente monografía se encuentra centrada en el análisis de las innovaciones que, en la actualidad son usadas para el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo, desde una perspectiva integral con un enfoque agronómico. En un contexto cambiante y de incertidumbre climática, la mejora de las prácticas agrícolas a través de la implementación de tecnologías avanzadas, representa una herramienta fundamental para la garantía de la sostenibilidad y la resiliencia del sector agro.

En primera instancia se describe e identifican tecnologías modernas que son bastante usadas en el monitoreo del suelo, al igual que otros métodos, de tal forma que se plantean herramientas tales como las imágenes satelitales, los sensores de húmedas y nutrientes, los modelos climáticos y los drones, con la finalidad de hacer una evaluación en cuanto a sus aplicaciones y su efectividad dentro de la agronomía, llegando así a la comprensión de cada tecnología y su contribución exacta en la gestión y la eficiencia de los recursos agrícolas, y como estas llegan adaptarse a los constantes cambios, las condiciones de los cultivos y el estado del suelo.

Seguido se hizo una recopilación de ventajas y limitantes de las tecnologías que se encuentran en el mercado, por lo que, se estiman aspectos importantes tales como, accesibilidad, costo, precisión y escalabilidad, puntualizando áreas clave que sirvan como soporte para investigaciones futuras, puesto que estas proporcionan una visión esclarecida de los desafíos y mejoras del uso de estas tecnologías.

Para finalizar, se hace una síntesis de los hallazgos, de tal manera que se emiten recomendaciones de carácter práctico que a su vez sirven como foco de orientación para

una aplicación efectiva de estas herramientas innovadoras en el sector agro, de tal manera que se proponen un conjunto de estrategias que permiten la integración de estas tecnologías de tal forma que aumenten su impacto en el sector y así se logren disminuir las limitaciones identificadas, contribuyendo a la adaptación de la agricultura sostenible.

Descripción de problema

En actualidad, aunque existen diversos avances relacionados con la comprensión del cambio climático y su impacto en los suelos, sigue siendo limitada la capacidad para monitorear y predecir exactamente su comportamiento. De acuerdo con un informe de evaluación de la plataforma intergubernamental científico normativa acerca de la biodiversidad y servicios de los ecosistemas, aproximadamente un 25% de los suelos a nivel mundial se encuentran en estado de degradación, lo cual se debe a factores tales como la pérdida de la materia orgánica, la erosión y otros fenómenos causados a raíz del cambio climático.

En cuanto a la economía, el tema de degradación de las tierras representa pérdidas de recursos significativos, por lo que de acuerdo con la FAO (2020), anualmente un aproximado de 24.000 millones de toneladas de suelo fértil se pierden gracias a la erosión, lo cual se traduce en pérdidas económicas de aproximadamente 40.000 millones de dólares; en este mismo sentido, según un informe publicado por el Estado de seguridad alimentaria y de nutrición en el mundo, el daño por erosión de los suelos, representa pérdidas en la fertilidad y posteriormente agrava la inseguridad alimentaria, afectando consecuentemente a 815 millones de agricultores y no agricultores del mundo (FAO et al., 2022); de acuerdo con el World Resources Institute (2023), a nivel global se estima que al menos un 40% de los suelos agrícolas se encuentran en estado de acidificación, lo cual afecta la producción de nutrientes que son esenciales para la preservación de las plantas, lo que daña y minimiza la productividad agrícola.

Por lo anteriormente mencionado, es necesario decir que para hacer un abordaje de estos desafíos, es necesario hacer uso de aplicativos de diferentes innovaciones

tecnológicas las cuales parten de métodos ya conocidos que generalmente son costosos en cuanto a mano de obra y poseen limitación en términos de escala y resolución espacial, por lo que según el Centro internacional de investigadores para el desarrollo (2022), solo un 10% de los suelos agrícolas globales tienen la manera de poseer sistemas de monitoreo, lo cual se traduce en límites de capacidad agrícola y posteriormente en incertidumbre en proyecciones futuras debido al cambio climático.

Finalmente, según el IPCC (2022), los cálculos de estimación que informan acerca de la disponibilidad del agua en los suelos, la posibilidad de erosión y capacidad de distribución de nutrientes, son categorías que se encuentran limitadas y con incertidumbre, lo que afecta la planificación y la implementación de las medidas efectivas para la adaptación y posterior mitigación de los impactos del cambio del clima en el suelo, garantizando la sostenibilidad y la seguridad alimentaria.

De acuerdo con anterior es necesario preguntarse: ¿Cuáles son las principales innovaciones tecnológicas aplicadas al monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo desde una perspectiva agronómica?

Justificación

El cambio climático en la actualidad significa una amenaza inminente para la estabilidad de los ecosistemas en tierra, representando la fuente de diversos fenómenos en los suelos, siendo uno de los recursos más afectados, en este sentido, el medio ambiente al sufrir una serie de impactos negativos, tales como la erosión, la degradación, la desertificación, la salinización y la acidificación, que colocan en riesgo la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas (Aguirre et al., 2022), por lo que, esta problemática plantea un riesgo urgente que requiere atención prioritaria y con soluciones innovadoras.

En este contexto, la implementación de innovaciones tecnológicas para monitorear y predecir el impacto del cambio climático en el suelo es una necesidad fundamental para la mitigación de los efectos y la promoción de la gestión sostenible, de tal manera que es necesario hacer un abordaje de la problemática desde una perspectiva integral que combine la comprensión científica del cambio climático y sus efectos en el suelo con el desarrollo de herramientas tecnológicas avanzadas que puedan permitir el monitoreo y predicción de estos impactos de manera precisa y oportuna. (Lozano et al., 2021)

A nivel de Colombia, es necesario el abordaje de este problema, el cual lleva consigo un impacto directo en la seguridad alimentaria y el desarrollo socioeconómico de las comunidades, ya que, en algunas regiones (80%), la agricultura es una fuente fundamental para el sustento y desarrollo económico, teniendo el suelo como una base primordial en la producción de alimentos, siendo un elemento esencial en la lucha contra el hambre y la pobreza. (Bula, 2020)

Por su parte en un contexto mundial, es importante mencionar que los suelos representan un pilar necesario para la mitigación del cambio climático al actuar como un sumidero de carbono y albergar una gran diversidad de microorganismos que contribuyen a ciclos biogeoquímicos clave; por lo que, el cambio climático está representando una alteración en los procesos naturales, siendo una amenaza a su capacidad para actuar como un regulador del clima, por tal razón, el desarrollo de tecnologías innovadoras para monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo es fundamental para comprender mejor las dinámicas y el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación y adaptación. (Galindo et al., 2020)

En la presente monografía se hará un enfoque específicamente en el análisis de las innovaciones tecnológicas destinadas al monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo desde una perspectiva agronómica a largo plazo, ya que en la actualidad la crisis climática representa requiere de un abordaje proactivo que permita la comprensión y mitigación de los efectos adversos del cambio climático en la agricultura, de la misma manera, en la en la seguridad alimentaria y el medio ambiente.

Para la búsqueda de información se hará uso de del gestor bibliográfico Zotero, el cual se reconoce por su eficiencia, facilidad de uso, capacidad de organización, gestión de referencias bibliográficas en orden sistemático, permitiendo una revisión puntual de la literatura científica acerca del tema abordado; en cuanto a la metodología de búsqueda de información se usaron bases de datos tales como PubMed, Web of Science y Scopus, scielo, Google académico y Elsevier, haciendo uso de términos de búsqueda relacionados con el cambio climático, agricultura, tecnología, suelos y predicción, además, se hará

empleo de un análisis minucioso de revistas científicas, informes técnicos y documentos gubernamentales pertinentes.

En cuanto a la línea de investigación de eje será la de cambio climático, ya que la monografía se centrará en identificar las tecnologías emergentes y las mejores prácticas en el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo, con el objetivo de proponer estrategias innovadoras y sostenibles para la adaptación y mitigación de sus efectos negativos, por lo que su relevancia se puntualizara también en la generación de conocimiento científico, así como por su potencial para informar políticas y prácticas de manejo de suelos más efectivas y sostenibles, contribuyendo a la concienciación y la acción frente al cambio climático, promoviendo un desarrollo más resiliente y sostenible en las comunidades agrícolas y en la sociedad en general.

Objetivos

Objetivo general

Analizar las innovaciones tecnológicas enfocadas en el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo desde una perspectiva agronómica.

Objetivos específico

Identificar las principales tecnologías utilizadas en el monitoreo del suelo y otros métodos emergentes, centrándose en su aplicabilidad y efectividad en el contexto agronómico de América latina.

Mencionar las ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles, considerando aspectos como costo, accesibilidad, precisión y escalabilidad, para la identificación de las áreas de oportunidad.

Sintetizar hallazgos que proporcionen recomendaciones prácticas para la aplicación en el ámbito agronómico de áreas clave que requieren atención adicional en el futuro.

Estado del arte

Como antecedentes para esta monografía se abordaron diversos estudios a través de los cuales se investigaron diferentes estudios previos, como el que realizó Flórez et al (2020), el cual, con el objetivo de fortalecer las capacidades locales para utilizar sistemas de alerta temprana en la gestión de plagas en los Andes, mediante la implementación de la herramienta ILCYM para desarrollar modelos fenológicos y mapas de riesgo basados en datos climáticos; dando como resultado una mejora en cuanto a la precisión en la emisión de alerta y una reducción en el uso de pesticidas, lo que posteriormente incrementó la resiliencia agrícola, demostrando su efectividad en la predicción de riesgos y en la implementación de estrategias de manejo, aportando una solución innovadora para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Seguidamente es necesario mencionar el estudio realizado por Trujillo et al (2018), el cual tuvo como objetivo optimizar la producción y distribución de alimentos, mediante un modelo conservacionista, en países subdesarrollados, por lo que plantearon el concepto de innovación tecnológica como interacción exitosa entre nuevas tecnologías y conocimientos, abarcando mercado, ambiente, políticas y ciencia, destacando la necesidad de enfoques agroecológicos, por lo que los resultados concluyeron que como clave para mejorar la productividad, gestionar desechos y desarrollar productos para salud y ambiente, frente a la falta de infraestructura adecuada.

Brigido et al (2015), estimaron el impacto del cambio climático en la fertilidad del suelo y la productividad del café en Veracruz, México, en este sentido, aplicaron tres modelos de circulación global y dos escenarios de forzamiento radiactivo, utilizando un modelo de desarrollo del cultivo de IIASA/FAO. Compararon condiciones climáticas

actuales con datos de la SAGARPA, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.93, prediciendo así una reducción de hasta 34% en la productividad del café al final del siglo XXI, principalmente debido a cambios en la precipitación. Concluyeron que ignorar la alteración de la fertilidad del suelo podría causar errores de hasta 40% en la estimación de productividad, subrayando la importancia de considerar este factor.

Turrent et al (2016), exploraron la seguridad alimentaria de México frente al cambio climático en la primera mitad del siglo XXI, por lo que examinaron una población en crecimiento, dependencia alimentaria creciente y degradación de recursos naturales debido a un modelo extractivista, en este sentido identificaron la obsolescencia de la tecnología agrícola actual y destacaron la fragilidad de tierras de ladera a la erosión. Propusieron planes de investigación a mediano y largo plazo para desarrollar tecnologías de transición y adaptación avanzada, resaltando así la necesidad de tecnologías multiobjetivo, recirculación de germoplasma elite, aprovechamiento del germoplasma nativo y desarrollo de cultivos perennes.

Basantes (2018), evaluó la innovación tecnológica en el sistema de riego en Peribuela, provincia de Imbabura, Ecuador, para diseñar estrategias de adaptación al cambio climático. La investigación no experimental y transversal utilizó ARCGis 10.3 y la matriz de Vester para analizar problemas de gestión del agua, por lo que, evaluaron 19 indicadores de sostenibilidad mediante el Índice de Sostenibilidad del Recurso Hídrico Agrícola, dando como resultado que, la implementación del canal incrementó en un 12.07% el uso de sistemas de riego tecnificados como goteo y aspersión, especialmente en invernaderos y reservorios, mejorando la eficiencia en cultivos de tomate, finalmente

proponiendo seis estrategias de adaptación centradas en la gestión sostenible del agua y el desarrollo de capacidades locales, optimizando el manejo hídrico en Peribuela.

Marco teórico

Innovaciones tecnológicas

Cubillos et al (2020), menciona en su estudio que la innovación tecnológica es como la creación, desarrollo y aplicación de nuevas soluciones, dispositivos, procesos o servicios que implican avances significativos en el ámbito tecnológico, puesto que, estas innovaciones se encuentran en diversas áreas, las cuales sostienen aspectos relacionados con la tecnología de la comunicación, la biotecnología, la energía renovable, la robótica, la inteligencia artificial y más.

Las innovaciones tecnológicas tienen una característica la cual, es la capacidad para resolver problemas que ya existen de una forma eficiente, efectiva y sostenible, lo que a su vez conlleva a la optimización de procesos productivos, mediante la creación de productos y servicios nuevos, la mejora de la calidad de vida y también la producción de beneficios sociales y económicos. (Morales & Freire, 2021), paralelamente, Vargas (2021), menciona que nacen como una respuesta a las necesidades identificadas en el entorno o en el mercado, permitiendo la satisfacción de demandas específicas, que mejoren la competencia de las empresas, los desafíos a nivel mundial como lo es los cambios en el clima, la salud pública o la falta de los recursos.

Estas tecnologías de innovación tienen un impacto disruptivo en los modelos de negocio, ya que se encargan de desafiar prácticas preestablecidas, haciendo cambios importantes en la manera como se elaboran las diversas actividades relacionadas con la economía (Alonso, 2020); como lo fue la llegada del internet y las tecnologías de la información, haciendo cambios en las industrias, como por ejemplo, el ejemplo el comercio

minorista, el área de la educación, los bancos, el área de la salud y el entretenimiento, fomentando nuevas maneras de interacción, transacción y acceso a la información.

Identificación de tecnologías de monitoreo del suelo en agronomía

Según Andreu et al (2021), la identificación de tecnologías de monitoreo del suelo en agronomía, lleva consigo un modelo de herramientas basadas en técnicas, las cuales se usan para recolectar información precisa de las condiciones en las que se encuentran los suelos, partiendo desde la composición, hasta su manejo, salud y otros factores, teniendo en cuenta el cambio climático, haciendo un papel protagónico en la gestión agronómica, proporcionando datos para la toma de decisiones relacionadas con la producción de cultivos, la conservación del suelo y la mitigación de impactos ambientales.

Por su parte, Rubio et al (2020), menciona que una de las tecnologías de este campo es la teledetección, la cual hace uso de sensores remotos que se encuentran ubicados en plataformas aéreas o satelitales, capturando una gama de imágenes de toda la superficie del área terrestre emitiendo información sobre la cobertura del suelo, la vegetación, la humedad y otros parámetros relevantes. Harvest (2024), también menciona que la teledetección permite monitorear grandes áreas de manera eficiente y proporciona datos a diferentes escalas espaciales, lo que la convierte en una herramienta invaluable para estudiar los efectos del cambio climático en el suelo.

Los sistemas de información geográfica (SIG) para Saldana (2020), se plantean como otra tecnología ampliamente utilizada en la agronomía para el monitoreo del suelo, puesto que integran datos espaciales y tabulares para crear mapas interactivos que muestran la distribución y características del suelo en un área determinada, por lo que estos mapas

pueden incluir información sobre la textura del suelo, la composición química, la erosión y otros parámetros relevantes para la gestión agrícola; permitiendo analizar patrones espaciales y temporales en los datos del suelo y son una herramienta invaluable para la planificación de cultivos, la gestión de recursos y la toma de decisiones estratégicas (Buzai, 2020)

Además de la teledetección y los SIG, existen otras tecnologías emergentes que están transformando el monitoreo del suelo en agronomía según Guzmán et al (2022), los sensores remotos montados en vehículos terrestres o drones pueden recopilar datos detallados a nivel de campo sobre parámetros como la humedad del suelo, la temperatura y la conductividad eléctrica, por lo que estos datos proporcionan información en tiempo real sobre las condiciones del suelo y son especialmente útiles para la toma de decisiones operativas en la agricultura de precisión.

Otra tecnología prometedora es la espectroscopia de reflectancia difusa, que utiliza la interacción entre la luz y el suelo para determinar su composición y propiedades físicas, de acuerdo con Meneses (2020), esta técnica permite analizar muestras de suelo en el laboratorio o en el campo y proporciona información detallada sobre la textura, la materia orgánica, la estructura y otros parámetros relevantes. Paralelamente Martínez (2022), plantea que la espectroscopia de reflectancia difusa es una herramienta poderosa para el monitoreo del suelo en investigación agronómica y estudios de campo.

Ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles para el monitoreo del suelo

En el contexto agronómico, el monitoreo del suelo es fundamental para comprender su estado y las condiciones que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos, en este

sentido, las tecnologías disponibles para este propósito ofrecen una variedad de ventajas, pero también presentan limitaciones que deben ser consideradas cuidadosamente.

Ventajas

Mayor precisión y eficiencia: para un correcto monitoreo de los suelos, autores como Yin et al (2022), menciona que, a partir de la teledetección al igual que la aplicación de los conocidos sensores remotos se obtienen datos puntuales acerca de las condiciones del suelo sin necesidad de estar en la misma zona, por lo que, muestra una visión en tiempo real y con actualización constante de las características del suelo y como estas pueden variar en diversas condiciones, facilitando un gestión eficiente y precisa.

Accesibilidad y facilidad de uso: muchas de las tecnologías disponibles para el monitoreo del suelo son relativamente accesibles y fáciles de usar, lo que las hace adecuadas para agricultores y profesionales agrónomos sin experiencia, puesto que los dispositivos portátiles y las aplicaciones móviles han simplificado el proceso de recopilación y análisis de datos, permitiendo una mayor participación y adopción por parte de los usuarios. (Martínez et al., 2021)

Rapidez y tiempo real: de acuerdo con Yin et al (2022), ciertas tecnologías de monitoreo del suelo suministran datos en tiempo casi real, lo que permite reaccionar con prontitud frente a variaciones en las condiciones del terreno o cambios en el entorno agrícola. Gracias a ello, es posible tomar decisiones operativas y estratégicas acertadas en cuanto a la dirección de los cultivos, la aplicación de fertilizantes o el riego; asimismo, el seguimiento constante proporciona información valiosa para optimizar la agricultura y ajustar con precisión la gestión de los recursos a las necesidades reales del suelo.

Reducción de costos y recursos: en comparación con los métodos tradicionales de muestreo y análisis de suelo, las tecnologías de monitoreo pueden ofrecer una alternativa más económica y eficiente en términos de costos y recursos, puesto que, la capacidad de recopilar datos a través de dispositivos portátiles o sensores remotos puede reducir la necesidad de realizar muestreos extensivos o costosos análisis de laboratorio. (Martínez et al., 2021)

Limitaciones

Precisión limitada en ciertas condiciones: aunque las tecnologías de monitoreo del suelo han mejorado significativamente en términos de precisión, todavía pueden ser limitadas en su capacidad para proporcionar mediciones precisas en ciertas condiciones, como suelos altamente heterogéneos o áreas con cobertura vegetal densa. Esto puede afectar la confiabilidad de los datos y la interpretación de los resultados. (Martínez et al., 2021)

Dependencia de la calibración y validación: Khanal et al (2020), mencionan que, la exactitud y fiabilidad de la información obtenida a través de las tecnologías de monitoreo del suelo depende en gran medida de la calibración y validación precisa de los dispositivos y métodos empleados, ya que sin la calibración adecuada o la comprobación insuficiente pueden conducir a errores en las mediciones que distorsionen los resultados. Debido a que la falta de calibración precisa o validación detallada podría dar lugar a imprecisiones en las lecturas que tergiversaran las conclusiones, es fundamental realizar ajustes minuciosos de los instrumentos de monitoreo y comprobar rigurosamente que proporcionan datos fieles.

Costos iniciales y de mantenimiento: aunque algunas tecnologías de monitoreo del suelo pueden ser más económicas en términos de costos operativos a largo plazo, la inversión inicial en equipos y dispositivos puede ser significativa, además, los costos de mantenimiento y actualización de hardware y software también deben ser considerados para garantizar un funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo. (Martínez et al., 2021)

Limitaciones técnicas y de infraestructura: en algunas áreas rurales o en países en desarrollo, la disponibilidad de tecnología y la infraestructura necesaria para implementar sistemas de monitoreo del suelo pueden ser limitadas, por otro lado, la falta de acceso a internet, energía eléctrica o capacitación técnica puede dificultar la adopción y uso efectivo de estas tecnologías en ciertos contextos. (Martínez et al., 2021)

Metodología

Método

La metodología empleada es de carácter cualitativo basada en una revisión bibliográfica de tipo sistemático, permitiendo la recopilación, síntesis y análisis de la literatura disponible acerca del tema de las innovaciones tecnológicas para monitorear y predecir el impacto del cambio climático en el suelo agronómico, dando una comprensión del desarrollo tecnológico actual y sus aplicaciones dentro del sector agrícola. (Pardal & Pardal, 2020)

La revisión fue elaborada a través de una guía PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual es reconocida por su estructura organizada, percepción integral del proceso de revisión, garantizando una búsqueda de literatura mediante la aplicación de criterios de inclusión y exclusión que aseguren la evaluación crítica de las innovaciones tecnológicas en el ámbito en el sector de la agronomía. (Asar et al., 2019)

En este sentido, el proceso se vincula a una búsqueda en bases de datos académicas en español, con repositorios institucionales y otras fuentes relevantes, utilizando criterios específicos de inclusión y exclusión para asegurar la relevancia y calidad de los estudios seleccionados, mediante el empleo de palabras clave y combinaciones de términos para refinar los resultados, y se realizó una revisión inicial de títulos y resúmenes, seguida de una evaluación detallada de los artículos completos. La información relevante se organizó en matrices de datos para facilitar la comparación y análisis temático, permitiendo identificar patrones, tendencias y lagunas en la investigación actual, asegurando una

cobertura comprensiva y una evaluación crítica de las innovaciones tecnológicas en el contexto agronómico.

Paradigma

El paradigma de monografía es el interpretativo, que se centra en comprender y contextualizar el conocimiento existente desde una perspectiva cualitativa (Keller, 2023). Este enfoque permite explorar las diversas interpretaciones y significados que los autores atribuyen a las innovaciones tecnológicas y sus implicaciones en la agricultura y el manejo del suelo (de Franco & Solórzano, 2020)

Fuentes de información

Bases de datos y repositorios

Para la recopilación de información relevante y de alta calidad, se utilizaron múltiples fuentes de datos, por lo que, la combinación de estas fuentes de información garantiza una revisión completa y rigurosa de la literatura existente, proporcionando una base sólida para el análisis y la síntesis de los datos recopilados.

Bases de datos académicas: se emplearon bases de datos académicas reconocidas como Scopus, Web of Science, Google Scholar y ScienceDirect para la búsqueda de artículos científicos, informes técnicos y tesis relacionados con el tema de innovaciones tecnológicas para monitorear y predecir el impacto del cambio climático en el suelo agronómico, proporcionando acceso a una amplia gama de literatura revisada por pares y otras publicaciones académicas de alta calidad.

Repositorios institucionales: adicionalmente, se consultaron repositorios institucionales de universidades y centros de investigación especializados en agronomía y

cambio climático. estos repositorios ofrecieron acceso a documentos, tesis, trabajos de investigación y publicaciones institucionales que pueden no estar disponibles en las bases de datos académicas comerciales.

Criterios de inclusión y exclusión

Este conjunto de criterios, aseguraron la selección de estudios de alta calidad y relevancia, garantizando que la revisión bibliográfica fuera exhaustiva y rigurosa.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios	Inclusión	Exclusión
Periodo de publicación	Estudios publicados en los últimos 10 años.	Estudios publicados hace más de 10 años.
Tema	Estudios que abordan innovaciones tecnológicas en el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo agronómico.	Estudios que no se centran en innovaciones tecnológicas o en el monitoreo y predicción del impacto climático en el suelo.
Idioma	Artículos publicados en inglés y español.	Artículos publicados en otros idiomas.
Acceso al texto completo	Estudios con acceso completo al texto.	Estudios con acceso restringido o solo disponibles en resúmenes.
Revisión por pares	Estudios revisados por pares.	Estudios no revisados por pares.
Claridad metodológica	Artículos con metodologías claras y bien definidas.	Artículos con metodologías poco claras o deficientemente explicadas.
Relevancia de datos	Estudios que proporcionan datos relevantes y útiles para los objetivos de la monografía.	Estudios que no proporcionan datos relevantes para los objetivos de la monografía.

Nota: En esta tabla se muestran los criterios de inclusión y exclusión empleados en la selección de documentos de la monografía. *Fuente:* autoría propia.

Proceso de búsqueda y selección

Estrategia de Búsqueda

Las estrategias de búsqueda inician con la aplicación de palabras clave, las cuales permiten tener una búsqueda más asertiva y relevante, puntualizando términos específicos de búsqueda que abarcan diversas dimensiones del tema. En la monografía en cuestión, las palabras clave incluyeron; tecnologías de monitoreo del suelo, impacto del cambio climático en la agricultura, sensores de suelo, teledetección, drones en agricultura, y modelos predictivos climáticos, las cuales fueron seleccionada para capturar un amplio espectro de estudios relacionados con el impacto del cambio climático y las tecnologías emergentes en la gestión del suelo.

Combinación de términos: se emplearon combinaciones de términos utilizando operadores booleanos (AND, OR, NOT) para refinar y optimizar los resultados de la búsqueda. El operador AND se utilizó para combinar términos que deben aparecer en los estudios seleccionados, mientras que OR se aplicó para incluir sinónimos y términos relacionados, y NOT se utilizó para excluir resultados irrelevantes. Este enfoque ayudó a filtrar y asegurar que los resultados obtenidos fueran relevantes y específicos para los objetivos de la monografía, facilitando una revisión más centrada y eficaz.

Selección de estudios

Revisión inicial: se realizó una revisión inicial de los títulos y resúmenes de los artículos recuperados para determinar su relevancia.

Evaluación detallada: los artículos seleccionados fueron evaluados en detalle, analizando su contenido completo para asegurar que cumplieran con los criterios de inclusión.

Análisis de datos

Extracción de información

Datos relevantes: se extrajeron datos clave de cada estudio para garantizar una comprensión completa del contenido, por lo que, estos datos incluyeron los objetivos del estudio, las metodologías empleadas, los resultados obtenidos, las conclusiones alcanzadas y las recomendaciones propuestas.

Matrices de datos: para facilitar la organización y comparación de la información, se utilizaron matrices de datos, las cuales permitieron estructurar la información de manera sistemática, destacando similitudes y diferencias entre los estudios revisados.

Análisis comparativo: se realizó un análisis comparativo para evaluar las similitudes y diferencias entre los estudios, destacando las innovaciones tecnológicas más prometedoras y sus impactos en la agricultura.

Validación y fiabilidad

Validación de fuentes

Revisión por pares: se priorizaron estudios revisados por pares y publicaciones en revistas de alto impacto para asegurar la calidad y fiabilidad de la información.

Triangulación: se utilizó la triangulación de datos, combinando información de diferentes fuentes y enfoques para corroborar los hallazgos y fortalecer la validez de la monografía.

Limitaciones del estudio

Alcance temporal: se reconoce que la revisión se limita a estudios publicados en los últimos 10 años, lo que puede excluir investigaciones relevantes más antiguas.

Acceso a información: la disponibilidad de acceso completo a ciertos estudios puede haber limitado la inclusión de algunos trabajos relevantes.

Elaboración de conclusiones y recomendaciones

Síntesis de hallazgos

Resumen de resultados: se llevó a cabo una síntesis de los hallazgos más relevantes, destacando las innovaciones tecnológicas más efectivas en el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en el suelo, incluyendo una evaluación de las aplicaciones prácticas de estas tecnologías, así como su impacto en la gestión agronómica. La información consolidada permitió identificar las tecnologías con mayor potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en el campo agrícola.

Recomendaciones: basándose en la evidencia revisada, se proporcionaron recomendaciones específicas para mejorar la implementación y desarrollo de tecnologías en el ámbito agronómico, las cuales se orientaron a optimizar el uso de las tecnologías existentes, abordar desafíos identificados y fomentar la adopción de innovaciones que puedan tener un impacto significativo en la productividad agrícola y la adaptación al cambio climático.

Identificación de áreas futuras de investigación

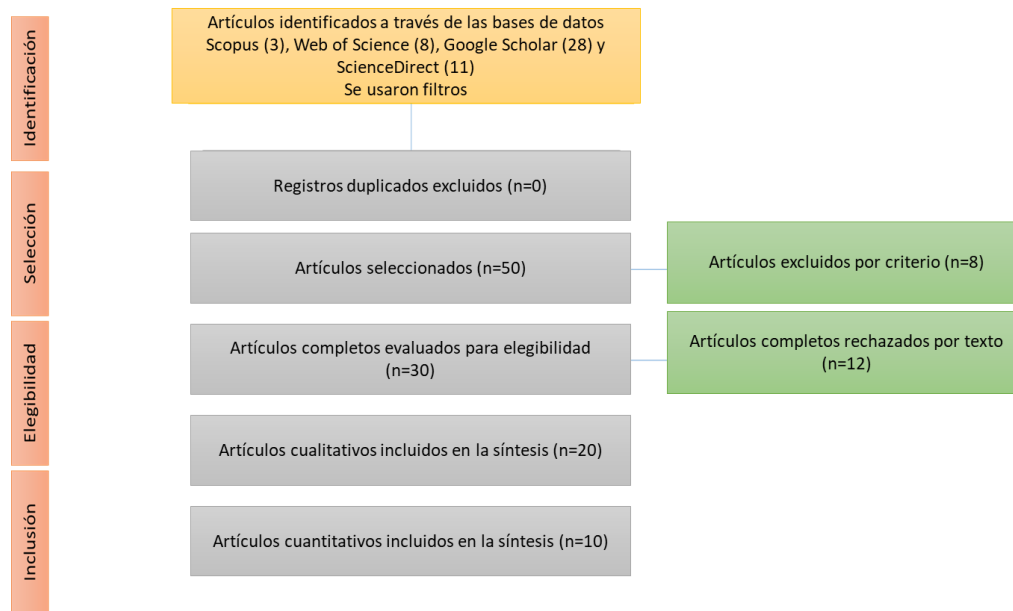
Oportunidades de investigación: se identificaron áreas clave para futuras investigaciones, centrándose en la mejora y adaptación de las tecnologías actuales, así como en el desarrollo de nuevas soluciones innovadoras, incluyendo la necesidad de explorar tecnologías emergentes, abordar limitaciones actuales y evaluar su aplicabilidad en contextos variados, por lo que, la identificación de estas áreas de investigación futura proporcionará una guía para avanzar en la investigación y el desarrollo de tecnologías que puedan enfrentar de manera más efectiva los desafíos del cambio climático en la agricultura.

Resultados

Para la elaboración y obtención de estos resultados se hizo la identificación de 50 documentos, los cuales se obtuvieron de las bases de datos tales como Scopus, Web of Science, Google Scholar y ScienceDirect, luego de hacer uso de la metodología descrita se hizo la selección de solo 30 estudios, por lo que, este proceso de selección se ilustra en el diagrama de flujo PRISMA adjunto (Figura 2), que muestra cada etapa de la selección de estudios, desde la identificación inicial hasta la inclusión final.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA



Nota: Se identificaron 50 artículos para la revisión inicial, de estos, 8 fueron excluidos tras la primera evaluación, y 12 más fueron rechazados tras un análisis del texto completo. Finalmente, se seleccionaron 30 estudios que cumplían con los criterios de elegibilidad, de los artículos seleccionados, 20 eran de carácter cualitativo y 10 de carácter cuantitativo, lo que permitió una combinación equilibrada de enfoques para el análisis. *Fuente:* Autoría propia.

Caracterización de los artículos

La caracterización de estos artículos se presenta en la Tabla 2, donde se detallan aspectos clave como el autor(es) y año, la tecnología o concepto abordado, el contexto y aplicación, y las conclusiones o beneficios identificados, proporcionando una visión amplia y equilibrada del análisis.

Tabla 2

Resumen de los aportes de cada artículo

Autor(es) y año	Tecnología o concepto	Contexto y aplicación	Conclusión/beneficio
González et al. (2020)	Sensores de humedad	Utilizados para medir el contenido de agua en el suelo.	Realiza un aporte en cuanto a la gestión de riesgos, previniendo las inundaciones y haciendo una base de ajustes para la optimización de los sistemas y la salud de la flora.
Elías (2022)	Sensores de nutrientes	Empleados para detectar niveles de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio.	Optimización de la fertilización al proporcionar información precisa sobre las necesidades del suelo, evitando la sobrefertilización y minimizando el impacto ambiental.
Moreno (2018)	Imágenes Multiespectrales e Hiperespectrales	Proporcionarán datos detallados sobre la salud del cultivo, la cobertura vegetal y las condiciones del suelo.	Facilitan la identificación de problemas como deficiencias nutricionales, enfermedades y plagas antes de que sean visibles a simple vista, permitiendo intervenciones tempranas y específicas.
Camacho y otros (2015)	Imágenes Multiespectrales e Hiperespectrales	Herramientas avanzadas para la captura de información en diferentes bandas del espectro electromagnético.	Permiten a los agricultores monitorear el estado de sus cultivos de manera más efectiva, posibilitando intervenciones tempranas para mitigar problemas potenciales.
González y otros (2016)	Drones	Herramienta emergente equipada con cámaras multiespectrales e hiperespectrales para recopilar datos precisos y en tiempo real sobre la variabilidad del campo.	Permite la identificación rápida y eficiente de áreas problemáticas, ofreciendo una visión integral del estado del campo y reduciendo significativamente el tiempo y los costos de la inspección manual.

Pino (2019)	Drones	Facilitan la cobertura de grandes extensiones de terreno en un tiempo relativamente corto.	Proporcionan una visión integral del campo, optimizando el monitoreo y reduciendo el tiempo y costos asociados con inspecciones manuales.
Sampaio y da Silva (2014)	Modelos climáticos	Utilizados para predecir cambios en las condiciones climáticas y evaluar su impacto en la agricultura.	Ayudan a los agricultores a planificar actividades agrícolas con anticipación e implementar medidas preventivas, reduciendo riesgos y mejorando la resiliencia frente a fluctuaciones climáticas.
Lozano y col. (2021)	Modelos climáticos	Integran datos sobre temperatura, precipitación y otros factores meteorológicos para anticipar eventos climáticos adversos.	Permiten adaptar estrategias de cultivo y manejo del suelo, mejorando la resiliencia de las prácticas agrícolas frente a las fluctuaciones climáticas.
Noriega y otros (2021)	Modelos de Crecimiento de Cultivos	Simule cómo factores ambientales como temperatura, humedad y nutrientes afectan el desarrollo de las plantas.	Ayudan a optimizar las prácticas agrícolas al predecir cómo las variaciones en el ambiente influirán en el rendimiento y calidad de los cultivos.
Soto y otros (2018)	Modelos de Crecimiento de Cultivos	Simulan escenarios de crecimiento de cultivos bajo diferentes condiciones ambientales.	Permiten ajustar prácticas de riego, fertilización y manejo para maximizar la producción y minimizar el impacto de factores adversos, promoviendo una agricultura más eficiente y adaptativa.
Muñoz (2019)	Internet de las Cosas (IoT)	Permite la integración de sensores y dispositivos conectados para un monitoreo continuo y en tiempo real en la agricultura.	Facilita la automatización de procesos agrícolas y mejora la eficiencia operativa, reduciendo costos al permitir intervenciones precisas y oportunas.
Zermeño et al. (2021)	Internet de las Cosas (IoT)	Utiliza sensores en el campo para recoger datos sobre variables críticas como la humedad del suelo, temperatura y estado de los cultivos.	Optimiza el rendimiento de los cultivos mediante el uso de datos en tiempo real, ajustando automáticamente procesos como el riego y fertilización.
Ponce (2017)	Big Data y Análisis Predictivo	Tecnologías clave para procesar y analizar grandes volúmenes de datos agrícolas, permitiendo la	Facilitan la toma de decisiones informadas al proporcionar insights detallados sobre posibles cambios futuros, ayudando a los agricultores a ajustar sus estrategias y prácticas agrícolas.

		identificación de patrones y tendencias ocultas.	
Herrera (2016)	Big Data y Análisis Predictivo	Utilizan algoritmos avanzados para realizar predicciones precisas sobre el impacto del cambio climático en el suelo y los cultivos.	Mejoran la productividad y reducen riesgos al permitir a los agricultores adaptar sus estrategias a condiciones emergentes.
Niño (2020)	Sensores de suelo	Proporcionan datos específicos sobre las condiciones del suelo con alta precisión.	Aunque son precisos, requieren mantenimiento regular para garantizar su precisión.
Martínez (2022)	Sensores de suelo	Comparados con otras tecnologías avanzadas, tienen un costo relativamente bajo.	Son más accesibles, pero pueden no ser prácticos para grandes extensiones de tierra debido a su cobertura limitada.
Ramírez y col. (2020)	Imágenes Satélites y Drones	Permitirán monitorear grandes áreas de cultivo con una cobertura amplia.	Facilitan la toma de decisiones rápida y eficiente, aunque su alto costo puede ser una barrera, especialmente para los pequeños productores.
Bonilla y otros (2023)	Imágenes Satélites y Drones	Facilitan la toma de decisiones rápidas y eficientes al proporcionar datos en tiempo real.	La calidad de las imágenes puede verse afectada por el clima, lo que puede limitar su efectividad en ciertas condiciones meteorológicas.
Torres y otros (2021)	Modelos de predicción y simulación	Ayudan a planificar estrategias de mitigación y evaluar diferentes estrategias de manejo mediante la simulación de escenarios.	Aunque valiosos, requieren datos precisos y actualizados para funcionar correctamente y pueden ser complejos de implementar y entender.
Vite y otros (2020)	IoT y Big Data	Proporcionan monitoreo continuo y constante de datos actualizados en la agricultura.	Facilitan la identificación de patrones y tendencias, aunque el costo de implementación puede ser elevado para pequeñas explotaciones agrícolas y presentan riesgos de seguridad de datos.
Pendey y otros (2023)	IoT y Big Data	Enfrentan desafíos relacionados con el costo de implementación y la seguridad de datos.	Requieren medidas robustas de seguridad para prevenir vulnerabilidades y ataques cibernéticos.
Sánchez et al. (2024)	Integración de Tecnologías para Monitoreo	Recomendamos la combinación de tecnologías como sensores de suelo, imágenes satelitales,	Permiten una gestión más precisa y eficiente de los cultivos y el suelo, optimizando el uso de recursos y mejorando la capacidad de respuesta a las condiciones cambiantes.

		drones e IoT para un monitoreo agronómico más efectivo.	
Serrano y col. (2024)	Desarrollo y Capacitación en Modelos Predictivos	Enfatizan la importancia de desarrollar modelos predictivos adaptados a condiciones locales y capacitar a los agricultores en su uso.	Mejoran la resiliencia de las prácticas agrícolas frente al cambio climático al permitir una mejor planificación
Mendoza (2023)	Modelos predictivos locales	Promover el desarrollo de modelos predictivos adaptados a condiciones locales y proporcionar capacitación a los agricultores.	Mejora la planificación de estrategias agrícolas y la adaptación a futuros cambios climáticos, aumentando la resiliencia.
Chang y Joel (2024)	Big Data y Análisis Predictivo	Inversión en sistemas de Big Data y análisis predictivo, con capacitación del personal para interpretar datos.	Facilita la toma de decisiones basada en datos y mejora la adaptación a las condiciones climáticas y del suelo.
Montoya y otros (2017)	Seguridad de Datos y Accesibilidad	Barreras para la adopción de nuevas tecnologías incluyen la seguridad de datos y el costo de implementación.	Implementar medidas de seguridad robustas y explorar opciones de financiamiento para facilitar una adopción más amplia.
Ibarra (2022)	Seguridad de Datos y Accesibilidad	Medidas de seguridad de datos y opciones de financiamiento para pequeños agricultores.	Asegura una adopción más amplia y segura de tecnologías innovadoras.
Soto (2020)	Investigación y Desarrollo Continuo	Fomento de la investigación y el desarrollo para adaptar y mejorar tecnologías existentes y explorar nuevas soluciones.	Permite a los agricultores mantenerse competitivo y preparados para futuros desafíos del cambio climático.
Mamani y Filippone (2018)	Investigación y Desarrollo Continuo	Mantenerse actualizado con los avances tecnológicos.	Facilita la adaptación a nuevos desafíos y mejora la competitividad agrícola.

Nota: en esta caracterización se brinda la principal información de los artículos y documentos seleccionado para la monografía. *Fuente:* Autoría propia.

En la caracterización anterior, se muestran aspectos tales como el autor(es) y año, la tecnología que abarca, el concepto, seguidamente el contexto y aplicación; y finalmente la

conclusión/beneficio, en donde se resaltan diversas tecnologías agrícolas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura, por otro lado, tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), drones y Big Data están facilitando un monitoreo continuo y en tiempo real, mejorando la toma de decisiones basada en datos, sin embargo, existen desafíos asociados, como el costo elevado y la seguridad de los datos, que deben ser abordados para garantizar una adopción más amplia y efectiva de estas tecnologías innovadoras.

Identificación de las principales tecnologías utilizadas en el monitoreo del suelo y otros métodos emergentes

Tecnologías principales identificadas

Sensores de humedad: de acuerdo con González et al (2020), los sensores de humedad permiten medir el contenido de agua en el suelo, contribuyendo a la gestión de los riesgos y previniendo el estrés causado por las aguas en los cultivos, dando informaciones en tiempo real, logrando permitir ajustes inmediatos de los sistemas para la prevención de riesgos para optimizar el uso del agua y mejorar la salud de las plantas.

Sensores de nutrientes: de acuerdo con Elías (2022), esta tecnología permite la detección de los niveles de nutrientes tales como el nitrógeno fósforo y potasio, permitiendo la optimización de la fertilización al proporcionar información precisa sobre las necesidades del suelo, evitando la sobre-fertilización y minimizando el impacto ambiental.

Imágenes multiespectrales e hiperespectrales: dentro de la estimación tecnológica, estas herramientas son de carácter avanzado ya que se encargan de proporcionar datos puntuales acerca de la salud de los suelos y los cultivos, dando aportes sobre la cultura

vegetal y las condiciones de la tierra, permitiendo la captura de la información en diferentes bandas del espectro electromagnético, lo que facilita la identificación de problemas como deficiencias nutricionales, enfermedades y plagas antes de que sean visibles a simple vista, por lo que, la precisión de estas imágenes permite a los agricultores monitorear el estado de sus cultivos de manera más efectiva, posibilitando intervenciones tempranas y específicas para mitigar problemas potenciales. (Camacho et al., 2015)

Drones: son una herramienta emergente que facilita la recopilación de datos precisos y en tiempo real sobre la variabilidad del campo, estos se encuentran equipados con cámaras multiespectrales e hiperespectrales, volando a diferentes altitudes para capturar imágenes detalladas del terreno agrícola, por lo que, esta capacidad de acuerdo con Gonzales et al (2016), permite a los agricultores identificar áreas problemáticas de manera rápida y eficiente, proporcionando una visión integral del estado del campo, ya que los drones pueden cubrir grandes extensiones de terreno en un tiempo relativamente corto, reduciendo significativamente el tiempo y los costos asociados con la inspección manual. (Pino, 2019)

Modelos climáticos: se utilizan para predecir cambios en las condiciones climáticas y evaluar su impacto en el suelo y la agricultura, por lo que, integran datos sobre temperatura, precipitación y otros factores meteorológicos para anticipar eventos climáticos adversos, como sequías o inundaciones. (Sampaio & da Silva, 2014). Al proporcionar proyecciones futuras, estos modelos ayudan a los agricultores a planificar sus actividades agrícolas con anticipación y a implementar medidas preventivas, con la capacidad de previsión permite adaptar estrategias de cultivo y manejo del suelo, reduciendo riesgos y

mejorando la resiliencia de las prácticas agrícolas frente a las fluctuaciones climáticas. (Lozano et al., 2021)

Modelos de crecimiento de cultivos: simulan cómo diferentes factores ambientales, como temperatura, humedad y nutrientes, afectan el desarrollo de las plantas, permitiendo a los agricultores optimizar las prácticas agrícolas al predecir cómo variaciones en el ambiente influirán en el rendimiento y la calidad de los cultivos. (Noriega et al., 2021) Mediante la simulación de escenarios, los agricultores pueden ajustar prácticas de riego, fertilización y manejo para maximizar la producción y minimizar el impacto de factores adversos, promoviendo una agricultura más eficiente y adaptativa. (Soto et al., 2018)

Internet de las cosas (IoT): permite la integración de sensores y dispositivos conectados para un monitoreo continuo y en tiempo real en la agricultura, mediante la implementación de sensores en el campo, los agricultores pueden recoger datos sobre variables críticas como la humedad del suelo, la temperatura y el estado de los cultivos, todo conectado a una plataforma centralizada. (Muñoz, 2019) Esta conectividad facilita la automatización de procesos agrícolas, como el riego y la fertilización, ajustando las operaciones en función de los datos recolectados; el IoT mejora la eficiencia operativa y reduce costos al permitir intervenciones precisas y oportunas, minimizando el uso innecesario de recursos y optimizando el rendimiento de los cultivos. (Zermeño et al., 2021)

Big Data y análisis predictivo: son tecnologías clave para procesar y analizar grandes volúmenes de datos agrícolas, permitiendo la identificación de patrones y tendencias ocultos en los datos, que no serían evidentes con métodos tradicionales (Ponce, 2017). Utilizando algoritmos avanzados, se pueden realizar predicciones precisas sobre el

impacto del cambio climático en el suelo y los cultivos, facilitando la toma de decisiones informadas al proporcionar aspectos claves detallados sobre posibles cambios futuros, ayudando a los agricultores a ajustar sus estrategias y prácticas agrícolas para adaptarse a las condiciones emergentes, mejorar la productividad y reducir riesgos. (Herrera, 2016)

Tabla 3

Tecnologías identificadas y principales aspectos

Tecnología	Aplicación	Beneficios
Sensores de humedad	Medir el contenido de agua en el suelo	Gestión óptima del riego, prevención del estrés hídrico
Sensores de nutrientes	Detectar niveles de nutrientes esenciales	Optimización de la fertilización, reducción del impacto ambiental
Imágenes multiespectrales	Proporcionar datos sobre salud del cultivo y cobertura vegetal	Detección temprana de deficiencias, enfermedades y plagas
Imágenes hiperespectrales	Datos detallados sobre condiciones del suelo	Evaluación precisa de la salud del suelo, identificación de problemas ocultos
Drones	Recopilación de datos en tiempo real	Identificación rápida de áreas problemáticas, monitoreo eficiente del campo
Modelos climáticos	Predicción de cambios climáticos	Planificación anticipada de actividades agrícolas, medidas preventivas contra eventos adversos
Modelos de crecimiento	Simulación de factores ambientales en el crecimiento de cultivos	Optimización de prácticas agrícolas, maximización del rendimiento
Internet de las cosas (IoT)	Monitoreo continuo y en tiempo real	Automatización de procesos agrícolas, mejora de la eficiencia y reducción de costos operativos
Big Data y análisis predictivo	Análisis y predicciones sobre el impacto climático	Identificación de patrones y tendencias, toma de decisiones informadas

Nota: en la tabla se identifican las principales tecnologías utilizadas en el monitoreo del suelo y otros métodos emergentes. *Fuente:* Autoría propia.

Ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles

La siguiente tabla ofrece una visión general de las ventajas y limitaciones de cada tecnología en el contexto del monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en la agricultura.

Tabla 4

Ventajas y limitaciones de las tecnologías disponibles

Tecnología	Ventaja	Limitaciones
Sensores de suelo	Alta precisión ya que proporciona datos que son específicos y brinda información acerca de las condiciones del suelo (Niño, 2020). Costos mucho más bajos en comparación con otras tecnologías avanzadas (Martínez, 2022).	Requiere mantenimiento y calibración constantemente para poder garantizar su precisión (Niño, 2020). No es práctico en extensiones de tierra y grandes porque su cobertura es limitada (Martínez, 2022).
Imágenes satelitales y drones	Tiene una cobertura grande que permite el monitoreo de áreas extensas (Ramírez et al., 2020) Brinda datos en tiempo real el cual permite y facilita la toma de decisiones rápida y eficiente (Bonilla et al., 2023)	Tiene costos altos cuando se trata de brindar imágenes en alta resolución (Ramírez et al., 2020). La calidad de las imágenes satelitales puede verse afectada por las condiciones meteorológicas (Bonilla et al., 2023).
Modelos de predicción y simulación	Realiza predicciones a largo plazo las cuales ayudan a planificar estrategias de mitigación (Torres et al., 2021). Permite la simulación de escenarios que permiten evaluar diferentes estrategias de manejo (Torres et al., 2021).	Requiere datos de entrada precisos y de la actualidad para poder brindar información correcta (Torres et al., 2021). Tienen un alto nivel de complejidad ya que los datos arrojados deben ser leídos por personas con conocimientos relacionados (Torres et al., 2021).
IoT y Big Data	Tiene la capacidad de elaborar un monitoreo continuo el cual brinda datos constantes y actualizados (Vite et al., 2020). Su análisis avanzado facilita la identificación de patrones y tendencias (Vite et al., 2020).	Su costo de implementación puede ser elevado sobre todo en empresas e industrias pequeñas agrícolas (Vite et al., 2020). Su seguridad puede generar costos anexos y tiene vulnerabilidades relacionadas con ataques cibernéticos (Pendey et al., 2023).

Nota: La tabla anterior destaca cómo cada tecnología ofrece ventajas y enfrenta limitaciones que

deben ser consideradas al implementar soluciones para el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en la agricultura. *Fuente:* Autoría propia.

La tabla anterior destaca cómo cada tecnología ofrece ventajas y enfrenta limitaciones que deben ser consideradas al implementar soluciones para el monitoreo y predicción del impacto del cambio climático en la agricultura. En primera instancia, los sensores de suelo, aunque son precisos y accesibles, tienen una cobertura limitada y requieren mantenimiento regular, lo que puede restringir su aplicabilidad en grandes extensiones agrícolas. Por otro lado, las imágenes satelitales y drones ofrecen una cobertura amplia y datos en tiempo real, pero su alto costo y la influencia de las condiciones meteorológicas pueden ser barreras significativas, especialmente para pequeños productores.

Los modelos de predicción y simulación son valiosos para planificar a largo plazo y evaluar diferentes escenarios, pero dependen de la calidad de los datos de entrada y pueden ser complejos de usar. Finalmente, el IoT y Big Data proporcionan un monitoreo continuo y análisis avanzado, pero enfrentan desafíos relacionados con el costo de implementación y la seguridad de los datos.

En conclusión, es importante mencionar que la necesidad de una evaluación cuidadosa al elegir la tecnología adecuada, teniendo en cuenta el equilibrio entre costo, cobertura y precisión, por lo que, la integración de múltiples tecnologías puede ofrecer una solución más robusta, aprovechando las fortalezas individuales mientras se mitigan las limitaciones inherentes.

Recomendaciones prácticas para la aplicación en el ámbito agronómico

Para abordar el impacto del cambio climático en la agricultura, es necesario hacer síntesis de los hallazgos de innovaciones tecnológicas. A continuación, se presentan recomendaciones prácticas basadas en una revisión, enfocadas en mejorar la aplicación agronómica y enfrentar desafíos futuros

Figura 2

Prácticas para la aplicación en el ámbito agronómico



Nota: Autoría propia.

Integración de tecnologías para monitoreo efectivo

La revisión bibliográfica ha revelado que la combinación de tecnologías, como sensores de suelo, imágenes satelitales, drones y iot, puede mejorar significativamente el monitoreo agronómico, por lo que, se recomienda implementar una solución integrada que combine sensores para medir variables específicas del suelo con imágenes satelitales y drones para una visión amplia y detallada, puesto que, permitirá una gestión más precisa y eficiente de los cultivos y el suelo, optimizando el uso de recursos y mejorando la capacidad de respuesta a las condiciones cambiantes. (Sánchez et al., 2024)

Desarrollo y capacitación en modelos predictivos

Los modelos de predicción y simulación son cruciales para anticipar el impacto del cambio climático (Serrano et al., 2024). Por lo que, es necesario promover el desarrollo de modelos predictivos adaptados a condiciones locales y proporcionar capacitación a los agricultores en el uso de estos modelos, ya que, esto les permitirá planificar mejor sus estrategias de manejo y adaptarse a futuros cambios climáticos, mejorando la resiliencia de sus prácticas agrícolas. (Mendoza, 2023)

Optimización de Big Data para toma de decisiones

El análisis de grandes volúmenes de datos puede identificar patrones y tendencias valiosas; en este sentido, Chang & Joel (2024), afirma que, invertir en sistemas de Big Data y análisis predictivo, asegura la capacitación del personal en la interpretación de datos, puesto que, la capacidad de realizar análisis avanzados facilitará la toma de decisiones basadas en datos y permitirá una adaptación más efectiva a las condiciones climáticas y del suelo. (Almeida et al., 2022)

Enfoque en seguridad y accesibilidad

La seguridad de los datos y el costo de implementación son barreras importantes para la adopción de nuevas tecnologías (Montoya et al., 2017). A manera de recomendación, es necesario implementar medidas robustas de seguridad de datos y explorar opciones de financiamiento o subsidios para reducir el costo de implementación, especialmente para pequeños agricultores, puesto que asegurará una adopción más amplia y segura de las tecnologías innovadoras. (Ibarra, 2022)

Investigación y desarrollo continuos

Las tecnologías emergentes están en constante evolución, por lo que, se recomienda fomentar la investigación y el desarrollo continuo para adaptar y mejorar las tecnologías existentes, y explorar nuevas soluciones que puedan abordar de manera más efectiva los desafíos del cambio climático en la agricultura. (Soto, 2020) Mantenerse actualizado con los avances tecnológicos permitirá a los agricultores mantenerse competitivos y preparados para futuros desafíos (Mamani & Filippone, 2018)

Conclusiones

Para concluir, es importante mencionar que las innovaciones como sensores avanzados imágenes satelitales y modelos predictivos se han encargado del monitoreo y el proceso de gestión de la agronomía de los suelos, funcionando como herramientas de evaluación puntual y precisa de las condiciones, haciendo fácil la toma de las decisiones informadas y la adaptación a los cambios en el clima, ya que, la integración de estas tecnologías brinda una visión detallada e integral, que es fundamental para hacer frente a los desafíos expuestos en los cambios climáticos y de la agricultura.

En cuanto a las principales tecnologías, es necesario decir que estas incluyen sensores tanto como de humedad como de nutrientes, de la misma manera imágenes multispectrales e hiperspectrales, drones, modelos climáticos y de crecimiento, IoT, y Big Data, ofreciendo ventajas en la medición y el proceso analítico de variables de agronomía; por lo que, para la gestión de riesgos son herramientas fundamentales ya que, permiten a partir de ellas hacer predicciones, obtener datos precisos en tiempo real, a través de la mejoría de la productividad agrícola.

De la misma manera, en cuanto a las limitaciones y ventajas teniendo en cuenta aspectos relacionados con la de precisión, costo y aplicabilidad, los sensores de suelo y drones ofrecen alta precisión y cobertura amplia, pero son de alto costo; ya que constantemente requieren mantenimiento; los modelos predictivos también brindan importantes proyecciones a largo plazo, pero el proceso de implementación es complejo; por su parte IoT y Big permiten el análisis automatizado y avanzado, enfrentando desafíos relacionados con la parte económica y de seguridad por lo que, hacer una identificación,

para el equilibrio de estas ventajas y limitaciones es clave para mejorar su implementación en la agricultura.

Para finalizar, es importante decir qué, para que haya una mejora en la gestión agrícola, frente a problemas relacionados con el cambio del clima se debe hacer a integración de diferentes tecnologías tales como, sensores, drones e IoT, puesto que, estos permiten tener una visión mucho más completa de los cultivos y los suelos, fomentando el desarrollo y la capacitación de los modelos predictivos locales, por lo que, es necesario hacer una planificación de diversas estrategias adaptativas que, permitan la optimización del uso de la Big Data, para tomar decisiones y hacer frente a los problemas relacionados con los costos y la seguridad con medidas de protección y financiamiento, contribuyendo a la adopción más efectiva y amplia de estas tecnologías.

Recomendaciones

Es recomendable hacer el fomento de la integración de tecnologías avanzadas, como sensores y modelos predictivos, de tal forma que se obtengan visiones generales de los suelos y los cultivos, por lo tanto, la implementación de estos sistemas permite la recopilación de datos precios y en tiempo real, ayudando a la optimización de las prácticas en las áreas agrícolas, adaptándose eficazmente a los cambios del clima y mejorando la resiliencia y sostenibilidad de la agricultura

Se aconseja priorizar la adopción de tecnologías como sensores de humedad y drones, dada su capacidad para proporcionar datos precisos y en tiempo real, de la misma manera, evaluar las necesidades específicas del terreno y los cultivos ayudará a seleccionar las herramientas más efectivas.

Para hacer un abordaje de las limitaciones de las tecnologías, se recomienda hacer una combinación de diversas herramientas para el aprovechamiento de las fortalezas y la minimización de las debilidades, por ejemplo, si se usan sensores para precisión local con drones para tener una cobertura amplia, equilibrando costos y cobertura, garantizando una implementación efectiva y duradera de estas tecnologías en la agricultura.

Se recomienda desarrollar un enfoque integrado que combine tecnologías avanzadas como IoT y Big Data con modelos predictivos y sensores específicos, de la misma manera, proporcionar capacitación a los agricultores en el uso de estas herramientas y explorar opciones de financiamiento para reducir costos, facilitará una adopción más amplia y efectiva, mejorando la gestión agrícola y la adaptación al cambio climático.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., Mercado, T. (2022). Suelo y cambio climático: Incluye estudio de casos. Editorial Unimagdalena.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=otxmEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=Aguirre,+S.+E.,+Piraneque,+N.+V.,+Mercado,+T.+\(2022\).+Suelo+y+cambio+clim%C3%A1tico:+Incluye+estudio+de+casos.+Editorial+Unimagdalena.&ots=5GnGSX0bFj&sig=bPGYBpsLILhU0BGcQ03R3FbNHe4](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=otxmEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=Aguirre,+S.+E.,+Piraneque,+N.+V.,+Mercado,+T.+(2022).+Suelo+y+cambio+clim%C3%A1tico:+Incluye+estudio+de+casos.+Editorial+Unimagdalena.&ots=5GnGSX0bFj&sig=bPGYBpsLILhU0BGcQ03R3FbNHe4)
- Almeida, O. X. B., Vera, W. D. B., Guevara, V. I. (2022). Big Data en la predicción meteorológica para cultivos. Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria, 6(16), 33-47.
<https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/158>
- Alonso, I. (2020). Digitalización e innovación tecnológica en la administración pública: la necesaria redefinición de los derechos de los empleados públicos. Temas laborales: Revista andaluza de trabajo y bienestar social, 151, 373-396.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7464160>
- Andreu, A., Carpintero, E., González, M. P. (2021). Teledetección para la Agricultura. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA): Sevilla, Spain, 1-41. <https://savannahwatch.cc/wp-content/uploads/2021/02/TELEDETECCION-SERVIFAPA.pptx.pdf>
- Asar, S., Jalalpour, S., Ayoubi, F., Rahmani, M. (2016). PRISMA; elementos de informe preferidos para revisiones sistemáticas y metanálisis. Revista de la Universidad de

Ciencias Médicas de Rafsanjan, 15 (1), 68-80. <https://journal.rums.ac.ir/article-1-3021-en.html>

Basantes, T. F. (2018). Estrategias de adaptación al cambio climático caso: innovación tecnológica en el canal de riego Peribuela, provincia de Imbabura (Master's thesis). <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8052>

Bonilla, C. A., Sánchez, D. I., Ramón, J. D. (2023). Digitalización de redes de distribución de agua, implementando imágenes satelitales, drones y sistemas de información geográfica. Respuestas, 28(3), 22-38. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/4156>

Brigido, J. G., Nikolskii, I., Terrazas, L., Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. Tecnología y ciencias del agua, 6(4), 101-116. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1182>

Bula, A. O. (2020). Importancia de la agricultura en el desarrollo socio-económico. <https://rephip.unr.edu.ar/bitstreams/d9042436-7d26-4d43-a85f-c865302ad83c/download>

Buzai, G. D. (2020). Geografía y Sistemas de información geográfica en contexto del Covid-19. <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/799>

Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). (2022). Informe sobre el Desarrollo Mundial: La agricultura y la lucha contra el hambre. https://accioncontraelhambre.org/sites/default/files/documents/global_impact_report_2022.pdf

- Chang, B., Joel, L. (2024). Integración efectiva de las tecnologías de Big Data en la agricultura (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024).
<http://190.15.129.146/handle/49000/15979>
- Cubillos, A. A. E., Calderón, J. A. A., Suescún, Ó. Y. B. (2020). Innovaciones tecnológicas en las fuerzas militares de los países del mundo: una revisión preliminar. *Revista Científica General José María Córdova*, 18(29), 213-235.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1900-65862020000100213&script=sci_arttext
- de Franco, M. F., & Solórzano, J. L. V. (2020). Paradigmas, enfoques y métodos de investigación: análisis teórico. *Mundo recursivo*, 3(1), 1-24.
<https://atlantic.edu.ec/ojs/index.php/mundor/article/view/38>
- Elías, Q. F. L. (2022). Sistema para el monitoreo de nutrientes del suelo mediante una red de sensores inalámbricos lpwan aplicado a la agricultura de precisión en cultivos de manzana en el cantón Pimampiro (Doctoral dissertation).
<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13401>
- FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. (2022). *El Estado de la Seguridad Alimentaria y la Nutrición en el Mundo*. Roma, Italia: FAO. ISBN 978-92-5-136521-2.
<https://openknowledge.fao.org/items/ec2794d0-7265-47d8-a9c1-439c7d836a50>
- Flores, P., Gamarra, H., Panchi, N., Fonseca, C., Carhuapoma, P., Pradel, W., Velasco, C. (2020). Mapas de riesgo: herramienta para la toma de decisiones en el control de plagas frente al cambio climático.

https://cgspace.cgiar.org/bitstream/10568/111451/1/Mapas%20de%20Riesgo_pp.pdf

Galindo, A. J., Domínguez, G., Arteaga, R. I., Salazar, G. (2020). Mitigación y adaptación al cambio climático mediante la implementación de modelos integrados para el manejo y aprovechamiento de los residuos pecuarios. Revisión. Revista mexicana de ciencias pecuarias, 11, 107-125. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11242020000500009&script=sci_arttext

González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., Sarmiento, F. (2016). Drones aplicados a la agricultura de precisión. Publicaciones e Investigación, 10, 23-37. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/1585>

González, C. F. (2020). Evaluación de un nuevo sensor de humedad de suelo inalámbrico de bajo costo (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ciencias Agrarias). <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12336>

Guzmán, J. A., González, M., Fernandez, J. A. S., Calvo, J. C. (2022). Uso de sensores remotos en la agricultura: aplicaciones en el cultivo del banano. Agronomy Mesoamerican, 48279-48279. <https://www.redalyc.org/journal/437/43771129020/43771129020.pdf>

Harvest, N. (2024). Uso de teledetección en las estadísticas e informes agrícolas en América Latina: Estado de situación. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-iica-11324-22030/Description>

- Herrera, C. A. (2016). Implementación de un módulo de análisis estadístico y predictivo para agricultura utilizando bigdata y machine learning, integrado al sistema iotmach (Bachelor's thesis, Machala). <https://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/7569>
- Ibarra, G. E. R. (2022). Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. Journal of computer and electronic science, theory and applications, 3(1), 34-38. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/CESTA/article/view/3978>
- IPBES (Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas). (2022). Informe de Evaluación sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas para las Américas. https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/downloads/americas_assessment_es.pdf
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). (2022). Informe de Evaluación sobre Cambio Climático 2022: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
- Keller, R. (2023). O paradigma interpretativo: uma introdução. Editora da PUCRS. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SqnBEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=Keller,+R.+\(2023\).+O+paradigma+interpretativo:+uma+introdu%C3%A7%C3%A3o.+Editora+da+PUCRS.&ots=-vHA4ChMS&sig=_uUAUvJJeIC7U5CzY1Wck7515CE](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SqnBEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=Keller,+R.+(2023).+O+paradigma+interpretativo:+uma+introdu%C3%A7%C3%A3o.+Editora+da+PUCRS.&ots=-vHA4ChMS&sig=_uUAUvJJeIC7U5CzY1Wck7515CE)
- Lozano, A., Alvarez, C. E., Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. Scientia Agropecuaria, 12(1),

101-108. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172021000100101&script=sci_abstract

Mamani, A., Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Revista agronómica del noroeste argentino*, 38(1), 9-21. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S2314-369X2018000100001&script=sci_arttext

Martínez, F. F. (2020). Desarrollo de modelo para determinar el stock de carbono orgánico del suelo con base en reflectancia difusa. Caso: Carimagua–Meta. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79000>

Martínez, J. A., Arnó, J., Escolà, A. (2022). Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión. https://repositori.udl.cat/bitstream/10459.1/84084/1/Sensores_conductividad_electrica.pdf

Martínez, J. A., Sánchez, J. M., Volke, T., Vallejo, V. E., Pérez, L. M., Duarte, P. A., Casallas, M. (2021). Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio. <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/10514>

Mendoza, G. J. (2023). Perspectivas de la agricultura rural en el Ecuador: una mirada a la tecnología e innovación en el sector agropecuario (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2023). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14770>

Meneses, D. A. (2020). Aplicación de la espectroscopía de reflectancia difusa (NIR) en el estudio de la conductividad eléctrica del suelo (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81398>

Saldana, M. P. J. (2020). Sistemas de información geográfica. Editorial UNED.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xjbeDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Saldana,+M.+P.+J.+\(2020\).+Sistemas+de+informaci%C3%B3n+geogr%C3%A1fica.+Editorial+UNED.&ots=wso4kyvJde&sig=ELneDhp-AoralxERHsdpWxyLNIA](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xjbeDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Saldana,+M.+P.+J.+(2020).+Sistemas+de+informaci%C3%B3n+geogr%C3%A1fica.+Editorial+UNED.&ots=wso4kyvJde&sig=ELneDhp-AoralxERHsdpWxyLNIA)

Montoya, E. A. Q., Colorado, S. F. J., Muñoz, W. Y. C., Golondrino, G. E. C. (2017).

Propuesta de una arquitectura para agricultura de precisión soportada en IoT. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, (24), 39-56.
<https://pdfs.semanticscholar.org/4c6f/37715e4314c1089a009cb5899cbac9a67ce0.pdf>

Morales, G. A., Freire, J. F. (2021). La innovación tecnológica: creando competitividad en

las empresas desarrolladoras de software. Podium, (39), 139-154.
http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2588-09692021000100139&script=sci_arttext

Moreno, J. D. (2018). Clasificación de imágenes multispectrales e hiperespectrales de alta resolución para la obtención de cartografía temática en Maspalomas (Master's thesis).

https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/25927/2/0743982_00000_0000.pdf

Muñoz, O. Q. (2019). Internet de las cosas (IoT). Ibukku LLC.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vnnEDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=Mu%C3%B1oz,+O.+Q.+\(2019\).+Internet+de+las+cosas+\(IoT\).+Ibukku+LLC.&ots=oSoAUWntum&sig=zajK8PKCZ6ZXF6iKvSHSMt7lfjo](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vnnEDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=Mu%C3%B1oz,+O.+Q.+(2019).+Internet+de+las+cosas+(IoT).+Ibukku+LLC.&ots=oSoAUWntum&sig=zajK8PKCZ6ZXF6iKvSHSMt7lfjo)

- Niño, Y. M. (2020). Análisis multitemporal mediante imágenes de sensores remotos para la determinación de los cambios de uso de suelo en el municipio de San Francisco de Sales, Cundinamarca (Colombia) entre los años 90's y 2018 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata). <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/111198>
- Noriega, J. L., Salazar, R., López, I. L. (2021). Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(1), 127-140. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342021000100127&script=sci_arttext
- Pandey, S., Gehlot, A., Pandey, V., Kathuria, N., Chhabra, G. y Malik, PK (2023). Subsuming AI, IoT and Big Data in Smart Farm Practices. *Devices for Integrated Circuit (DevIC)*. págs. 229-232. IEEE. https://www.researchgate.net/publication/371143002_Subsuming_AI_IoT_and_Big_Data_in_Smart_Farm_Practices
- Pardal, J. L., Pardal, B. (2020). Anotaciones para estructurar una revisión sistemática. *Revista orl*, 11(2), 155-160. https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S2444-79862020000200005&script=sci_abstract&tlng=en
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia (Arica)*, 37(1), 75-84. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292019000100075&script=sci_arttext&tlng=en
- Ponce, K. L. (2017). Análisis de datos basado en técnicas de Big Data y Data Mining para cultivos de hortalizas en el invernadero de la Granja La Pradera de la Universidad

Técnica del Norte (Bachelor's thesis).

<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/6698/1/04%20RED%20154%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>

Ramírez, M., Martínez, L., Montilla, M., Sarmiento, O., Lasso, J., Díaz, S. (2020). Obtención de coberturas del suelo agropecuarias en imágenes satelitales Sentinel-2 con la inyección de imágenes de dron usando Random Forest en Google Earth Engine. *Revista de Teledetección*, (56), 49-68.

<https://riunet.upv.es/handle/10251/159563>

Ramos, L. A., Orozco, I. (2020). Modelado de la producción de sedimentos en una cuenca con poca información incluyendo los potenciales efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo. *Acta universitaria*, 30.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-62662020000100135&script=sci_arttext

Rubio, A. P., López, D. H., Altamirano, H. L., González, E. Z. (2020). Teledetección en la agricultura de precisión: estado del arte de los índices de vegetación. *TECTZAPIC: Revista Académico-Científica*,

6(2), 46-58.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8504957>

Sampaio, G., da Silva Dias, P. L. (2014). Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. *Revista USP*, (103), 41-54.

[https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Silva-](https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Silva-Dias/publication/287863885_Evolucao_dos_Modelos_Climaticos_e_de_Previsao_d)

[Dias/publication/287863885_Evolucao_dos_Modelos_Climaticos_e_de_Previsao_d](https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Silva-Dias/publication/287863885_Evolucao_dos_Modelos_Climaticos_e_de_Previsao_d)

[e Tempo e Clima/links/57fa835208ae91deaa63251b/Evolucao-dos-Modelos-Climaticos-e-de-Previsao-de-Tempo-e-Clima.pdf](https://www.repositorio.unioja.es/Tempo_e_Clima/links/57fa835208ae91deaa63251b/Evolucao-dos-Modelos-Climaticos-e-de-Previsao-de-Tempo-e-Clima.pdf)

Sánchez, D. V., García, A. M. M., Zuleta, E. C., Casas, J. C., Londoño, L. F., Rua, M. O. B. (2024). Desarrollo de una arquitectura IoT para monitoreo ambiental: integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 91(231), 163-168.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9555682>

Serrano, L. T. C., Aguila, M. V. G., Suárez, J. A. C., Vivar, M. A. P. (2024). Optimización de sistemas de soporte de decisiones en agricultura mediante IA: un enfoque integrado: Optimization of decision support systems in agriculture using AI: an integrated approach. e-CUCBA, (21), 150-155. <http://e-cucba.cucba.udg.mx/index.php/e-Cucba/article/view/333>

Soto, A. M., Cotes, J. M., Rodríguez, D. (2018). Modelo de simulación del crecimiento y desarrollo de la papa criolla. Ciencia en Desarrollo, 9(1), 9-20. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-74882018000100009&script=sci_arttext

Soto, G. (2020). El continuo crecimiento de la agricultura orgánica: Orgánico 3.0. Revista de Ciencias Ambientales, 54(1), 215-226. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962020000100215

- Torres, Á. V., Cepeda, R. D. V., Cruz, I. L. L. (2021). Apropiación del espacio con agricultura: un estudio de aprendizaje asociativo mediante un modelo de simulación basado en agentes. *Papers. Revista de Sociología*, 106(2), 303-326.
<https://papers.uab.cat/article/view/v106-n2-velez>
- Trujillo, I., Pérez, O., Silvia, A., Camacho, C., Salazar, E. (2018). Innovaciones Biotecnológicas como Estrategia de Adaptación ante el Cambio Climático. *Tekhné*, 21(2). <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/3686>
- Vargas, A. H. (2021). La banca digital: Innovación tecnológica en la inclusión financiera en el Perú. *Industrial data*, 24(2), 99-120.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-99932021000200099
- Vite, H., Townsend, J., Carvajal, H. (2020). Big Data e Internet de las Cosas en la producción de plátano orgánico. *Revista Universidad y Sociedad*, 12 (4), 192-200.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202020000400192&script=sci_arttext
- World Resources Institute. (2023). *Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed 9 billion people by 2050*. Washington, DC: World Resources Institute.
<https://www.wri.org/research/creating-sustainable-food-future>
- Zermeño, F. J. F., Franco, E. G. C., Flores, F. J. (2021). Aplicaciones, enfoques y tendencias del Internet de las Cosas (IoT): revisión sistemática de la literatura. In *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2021* (Hidalgo, México, 20 al 22 de octubre (Vol. 13, No. 9, pp. 568-577).
<https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/543>

Apéndices

Apéndice A

Matriz de referencias para tecnologías en el monitoreo del suelo

Tecnología	Referencia	Aplicación	Beneficios	Ventajas	Limitaciones
Sensores de Humedad	González et al. (2020)	Medir contenido de agua en el suelo	Gestión óptima del riego, prevención del estrés hídrico	Alta precisión, costo relativamente bajo	Requiere mantenimiento regular, cobertura limitada
Sensores de Nutrientes	Elías (2022)	Detectar niveles de nutrientes esenciales	Optimización de la fertilización, reducción del impacto ambiental	Alta precisión en la detección de nutrientes, evita sobre-fertilización	Requiere calibración frecuente, costo moderado
Imágenes Multiespectrales	Moreno (2018); Camacho et al. (2015)	Evaluar salud del cultivo, cobertura vegetal	Detección temprana de deficiencias, enfermedades y plagas	Datos detallados sobre la salud de los cultivos	Alto costo, requiere software especializado para análisis
Imágenes Hiperspectrales	Moreno (2018)	Evaluar condiciones del suelo	Evaluación precisa de la salud del suelo	Datos detallados sobre el suelo	Costoso, requiere equipo avanzado y análisis complejo
Drones	Gonzales et al. (2016); Pino (2019)	Recopilar datos del campo	Identificación rápida de áreas problemáticas, monitoreo eficiente	Cobertura amplia, datos en tiempo real, reduce costos de inspección manual	Costo alto, afectado por condiciones meteorológicas
Modelos Climáticos	Sampaio & da Silva (2014); Lozano et al. (2021)	Predecir cambios climáticos	Planificación anticipada, medidas preventivas contra eventos adversos	Predicciones a largo plazo, permite evaluación de diferentes escenarios	Requiere datos precisos, puede ser complejo de implementar
Modelos de Crecimiento	Noriega et al. (2021); Soto et al. (2018)	Simular efectos ambientales en el crecimiento	Optimización de prácticas agrícolas, maximización del rendimiento	Simulación de escenarios variados, ajuste de prácticas agrícolas	Requiere datos precisos y actualizados, puede ser complejo de usar

Internet de las Cosas (IoT)	Muñoz (2019); Zermeno et al. (2021)	Monitoreo continuo y en tiempo real	Automatización de procesos, mejora de la eficiencia	Monitoreo continuo, optimización de recursos	Costo de implementación, seguridad de datos
Big Data y Análisis Predictivo	Ponce (2017); Herrera (2016)	Procesar y analizar grandes volúmenes de datos	Identificación de patrones, toma de decisiones informadas	Análisis avanzado, identificación de patrones y tendencias	Costo de implementación, seguridad de datos, necesidad de capacitación

Nota: Autoría Propia.