FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Bases conceptuales, evaluación del terreno y tecnologías de monitoreo

VOLUMEN I



Diego Javier Pérez Ortega
Jesús Geovanny Solarte Guerrero
Álvaro Javier Ceballos Freire
José Julián Apraez Muñoz
Carlos Arturo Betancourth García

Editorial
Universidad de Nariño

êditorial
Universidad de **Nariño**

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Bases conceptuales, evaluación del terreno y tecnologías de monitoreo

VOLUMEN I

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Bases conceptuales, evaluación del terreno y tecnologías de monitoreo

VOLUMEN I

Diego Javier Pérez Ortega
Jesús Geovanny Solarte Guerrero
Álvaro Javier Ceballos Freire
José Julián Apraez Muñoz
Carlos Arturo Betancourth García

êditorial
Universidad de **Nariño**

Fundamentos y aplicaciones de la agricultura de precisión : bases conceptuales, evaluación del terreno y tecnologías de monitoreo / Diego Javier Pérez Ortega … [y otros]—1ª. Ed.-- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2026

V. 1 : ilustraciones, fotografías, tablas

Contenido : Introducción a la agricultura de precisión. Evaluación cultivo y terreno. Herramientas tecnológicas. Muestreo georreferenciado suelo. Monitoreo de cultivos. Toma de decisiones. Plagas y enfermedades manejo integral.

Incluye Referencias bibliográficas al final de cada capítulo y reseña de los autores
p. 403 - 404

ISBN: 978-628-7933-17-0 Digital – Vol. I
ISBN: 978-628-7933-16-3 Digital – Obra completa

1. Agricultura de precisión 2. Agricultura de precisión—Tecnología e innovación 3. Suelos—Muestreo georreferenciado 4. Monitoreo de cultivos—Uso de sensores 5. Plagas y enfermedades—Manejo integral. I. Pérez Ortega, Diego Javier II. Solarte Guerrero, Jesús Geovanny III. Ceballos Freire, Álvaro Javier IV. Apraez Muñoz, José Julián V. Betancourth García, Carlos Arturo.

630.2085 F981 – SCDD-Ed. 22

Universidad de Nariño FUNDADA EN 1904

Universidad de Nariño ACREDITADA EN ALTA CALIDAD RESOLUCIÓN MEN 000322 • ENERO 11 DE 2023

SECCIÓN DE BIBLIOTECA

Volumen I
Fundamentos y aplicaciones de la agricultura de precisión: Bases conceptuales, evaluación del terreno y tecnologías de monitoreo

© Editorial Universidad de Nariño
© Ph.D Diego Javier Pérez Ortega, Ph.D Jesús Geovanny Solarte Guerrero, Ph.D Álvaro Javier Ceballos Freire, Ph.D José Julián Apraez Muñoz, Ph.D Carlos Arturo Betancourth García.

ISBN Obra completa (digital): 978-628-7933-16-3
ISBN (digital): 978-628-7933-17-0
DOI: https://doi.org/10.22267/lib.udn.084
Primera edición

Corrección de estilo: Yazmin Vanessa Benavides Albán
Diseño de cubiertas y diagramación: Liseth Motta Realpe
Contacto: lizalejamotta@gmail.com
Fecha de publicación: Octubre 2026
San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de su Autor o de la Editorial Universidad de Nariño

CONTENIDOS

15 CAPÍTULO 1
Introducción a la agricultura de precisión - AP

51 CAPÍTULO 2
Evaluación inicial del cultivo y el terreno

111 CAPÍTULO 3
Herramientas tecnológicas para la agricultura de precisión

157 CAPÍTULO 4
Muestreo georreferenciado del suelo

203 CAPÍTULO 5
Uso de sensores para monitoreo de cultivos

258 CAPÍTULO 6
Análisis de datos y toma de decisiones

302 CAPÍTULO 7
Fertilización y manejo de nutrientes de forma variable

350 CAPÍTULO 8
Manejo integrado de plagas y enfermedades

403 Acerca de los autores

Presentación

Desde que el ser humano aprendió a sembrar, la agricultura ha sido el cimiento de nuestra existencia. A lo largo del tiempo, esta actividad vital ha evolucionado al ritmo de los grandes cambios científicos, tecnológicos, sociales y ambientales. Hoy nos encontramos en una encrucijada histórica: vivimos en la era de la generación de datos, de la inteligencia artificial, del cambio climático, de la escasez de agua, del agotamiento y degradación del suelo... y, curiosamente, también en una era con el mayor potencial para reinventar nuestra forma de relacionarnos con la naturaleza y la tierra.

En este contexto surge con fuerza la agricultura de precisión (AP): un enfoque que integra la ciencia, la tecnología e innovación con un objetivo muy claro y urgente: producir mucho más, mucho mejor y con el menor impacto. La AP no es solo una técnica moderna; es una nueva manera de ver el agro, de entender su complejidad, y de actuar con sabiduría frente a sus desafíos.

Este libro, "Fundamentos y Aplicaciones de la Agricultura de Precisión Tomo I", nace como respuesta a las necesidades sentidas en el campo: contar con herramientas que conecten la tecnología con conocimientos ancestrales, que valoren la biodiversidad y que promuevan el compromiso ético con el planeta y su conservación. A lo largo de sus capítulos, intentamos proponer un recorrido que parte desde los principios básicos de la AP hasta sus aplicaciones actuales y reales, tanto en grandes explotaciones agrícolas como en pequeños sistemas agroforestales familiares, donde resisten y florecen en diversidad.

La base de la AP es simple, pero muy poderosa: entender que el campo no es un sistema uniforme. Históricamente, se ha tratado la parcela como un terreno homogéneo. Sin embargo, hoy sabemos que dentro de una misma hectárea pueden coexistir microambientes claramente diferenciados, cada uno con sus propias necesidades y requerimientos. Por eso, este enfoque propone observar al suelo, el clima, la morfología, topografía y los cultivos con mayor detalle, apoyándose en sensores, imágenes satelitales, drones, SIG, modelos predictivos y herramientas de análisis de datos que convierten la información generada en decisiones concretas y efectivas.

Como autores, creamos este libro con una visión amplia de qué es la agricultura de precisión y por qué marca una ruptura con los enfoques tradicionales. Hablamos de los grandes retos del mundo actual como el cambio climático, la inseguridad alimentaria, la pérdida de ecosistemas y la degradación ambiental y proponemos la AP como parte de la solución, adaptada al contexto local y regional. Luego, nos adentramos en la evaluación inicial del terreno y los cultivos, un paso fundamental para cualquier intervención seria. Aquí se integran aspectos físicos, químicos, microbiológicos, climáticos y topográficos, siempre desde una mirada integral que reconoce tanto el potencial productivo como los límites ecológicos de cada entorno.

Un rasgo distintivo de esta obra es su enfoque transversal agroecológico y agroforestal. En regiones como el sur de Colombia, desde Nariño hasta el Chocó donde se entrelazan la riqueza biológica, la fragilidad ambiental y la sabiduría campesina, afro e indígena, así como el norte de La Guajira al recóndito Amazonas, la AP debe ir mucho más allá de la eficiencia productiva. Debe ser una aliada de modelos sostenibles y sensibles a la complejidad de sistemas como los cultivos de cacao, café o aguacate bajo sombra, donde se necesita precisión técnica, pero también sentido común, respeto por el entorno y diálogo entre saberes.

A medida que avanzas en la lectura, encontrarás múltiples herramientas clave para implementar la AP en cualquier terreno: desde los muestreos

georreferenciados hasta las plataformas de análisis, pasando por sistemas de monitoreo en tiempo real, modelos predictivos y herramientas de apoyo para la toma de decisiones. Aquí no se trata solo de describir tecnología, sino de mostrar cómo, cuándo y por qué se aplica, con ejemplos reales que conectan la teoría con la práctica.

También dedicamos un espacio importante a la inteligencia artificial y al Internet de las Cosas (IoT), pilares de la nueva agricultura inteligente. Se presentan casos y experiencias exitosas de diversos sistemas productivos, con un enfoque especial en iniciativas colombianas y latinoamericanas, que demuestran que la innovación es posible incluso en contextos locales y reales con recursos limitados.

Por supuesto, no idealizamos este camino. Sería ingenuo pensar que la AP es una receta mágica. El acceso desigual a la tecnología, la falta de conectividad, la escasa formación técnica, el costo de equipos y la brecha digital en las zonas rurales de Latinoamérica y, en muchos casos del mundo, son obstáculos reales. Este libro no los esconde; por el contrario, los pone sobre la mesa y ofrece propuestas: políticas públicas, alianzas estratégicas, educación continua y apropiación tecnológica desde las comunidades.

Como autores, docentes universitarios e ingenieros comprometidos con el desarrollo rural, nuestra intención ha sido y siempre será, ofrecer una obra útil, crítica y aterrizada. No es un recetario para aplicar sin pensar. Es una invitación a repensar el agro con base en la ciencia, el respeto por la biodiversidad y la construcción colectiva de soluciones. Cada capítulo busca no solo informar, sino también inspirar.

En resumen, este libro responde a las grandes preguntas que guían al nuevo profesional del agro:

- ¿Cómo producir más sin arrasar?

- ¿Cómo lograr que lo sostenible también sea rentable?

- ¿Cómo utilizar la tecnología sin desconectarnos del territorio y la cultura?

- ¿Cómo liderar una transformación silenciosa desde las fincas y las comunidades y no desde los laboratorios, universidades y entidades?

La agricultura de precisión no es solo una caja de herramientas. Es una forma de ver, sentir y trabajar el campo. Es ciencia con raíces, tecnología con alma. Es una oportunidad histórica para reconciliar productividad con naturaleza, innovación con tradición.

Así que, bienvenidos a este viaje por los fundamentos y aplicaciones de una nueva agricultura y no olviden calibrar el dron.

Introducción

La agricultura ha sido, desde sus orígenes, mucho más que una actividad productiva: ha constituido una forma de habitar el territorio, de interpretar los ciclos de la naturaleza y de sostener la vida colectiva. En ella convergen conocimiento empírico, observación ecológica, capacidad de adaptación e innovación técnica. Sembrar, cuidar y cosechar no han sido únicamente acciones orientadas a la obtención de alimentos, sino expresiones históricas de organización social, cultura y permanencia. Por ello, aun en medio de profundas transformaciones tecnológicas, la agricultura continúa siendo el núcleo funcional y simbólico de numerosas comunidades rurales, especialmente en América Latina, donde persisten territorios de alta diversidad biológica, complejidad topográfica y riqueza sociocultural.

A lo largo del tiempo, la agricultura ha evolucionado de manera paralela al desarrollo de las sociedades humanas. Desde los sistemas tradicionales de manejo del suelo y el agua hasta la mecanización, la revolución verde y la digitalización contemporánea, cada etapa ha introducido nuevas herramientas para responder a los desafíos de su época. Sin embargo, el siglo XXI plantea exigencias de una magnitud y complejidad sin precedentes. El cambio climático, la creciente escasez de agua, la degradación física, química y biológica de los suelos, la expansión de plagas y enfermedades, la pérdida de biodiversidad funcional y la necesidad de producir alimentos suficientes, inocuos y accesibles obligan a replantear los modelos convencionales de producción agropecuaria.

En este escenario emerge la Agricultura de Precisión (AP) como un paradigma técnico y estratégico para la gestión diferenciada de los agroecosistemas. Su principio fundamental radica en reconocer que el campo no es homogéneo: dentro de una misma finca existen variaciones espaciales y temporales en textura del suelo, disponibilidad hídrica, fertilidad, vigor

del cultivo, presión biótica y respuesta productiva. En consecuencia, la AP propone sustituir los esquemas uniformes de manejo por decisiones sitio-específicas, sustentadas en datos confiables, monitoreo continuo y análisis integrados. Ya no se trata de aplicar insumos de manera generalizada, sino de intervenir con precisión donde, cuando y en la cantidad que el sistema realmente lo requiere.

Este enfoque se apoya en la articulación de múltiples herramientas tecnológicas, entre ellas sensores de suelo y cultivo, sistemas de posicionamiento global, teledetección satelital, drones, plataformas de información geográfica, estaciones meteorológicas automáticas, análisis multivariado, inteligencia artificial y Big data. La integración de estas tecnologías permite capturar, procesar e interpretar grandes volúmenes de información agroambiental para diagnosticar variabilidad, predecir escenarios, optimizar el uso de insumos y fortalecer la toma de decisiones en tiempo real. No obstante, la AP no debe entenderse como una simple acumulación de dispositivos o software, sino como una forma de gestión basada en conocimiento, orientada a mejorar simultáneamente la productividad, la eficiencia económica y la sostenibilidad ambiental.

Este libro surge precisamente con ese propósito: ofrecer una ruta formativa, crítica y aplicada para comprender los fundamentos y las aplicaciones de la Agricultura de Precisión en contextos reales. Está dirigido a estudiantes, docentes, investigadores, productores, extensionistas y profesionales de las ciencias agrarias, ambientales y agroforestales que buscan fortalecer sus capacidades para interpretar la variabilidad del territorio y transformar datos en decisiones agronómicas pertinentes. A lo largo de sus capítulos, el lector encontrará una progresión temática que va desde los conceptos base de la AP hasta sus aplicaciones avanzadas en monitoreo, automatización, inteligencia artificial, análisis económico, formación de talento humano y experiencias de implementación.

Sin embargo, uno de los aportes centrales de esta obra es asumir que la Agricultura de Precisión no puede analizarse únicamente desde la

innovación tecnológica. En regiones como América Latina, y particularmente en territorios rurales con limitaciones de conectividad, baja mecanización, laderas pronunciadas, economías familiares y una fuerte presencia de conocimiento local, la adopción tecnológica debe evaluarse desde criterios de pertinencia, accesibilidad e inclusión. Por ello, este texto propone una visión territorializada de la AP, en la que la modernización del agro no implique el desplazamiento del saber campesino, sino su articulación con nuevas herramientas de análisis y gestión.

Desde esta perspectiva, la AP se concibe como una tecnología adaptativa, capaz de dialogar con sistemas agroforestales, fincas diversificadas, cooperativas rurales y procesos de transición agroecológica. Su potencial no reside únicamente en aumentar la eficiencia técnica, sino también en contribuir a la resiliencia climática, al uso racional del agua, a la reducción de pérdidas por aplicación inadecuada de insumos y al fortalecimiento de estrategias productivas más sostenibles. Así, la agricultura de precisión se vincula estrechamente con enfoques de agricultura climáticamente inteligente y con metas globales asociadas a seguridad alimentaria, conservación de recursos y desarrollo rural sostenible.

Aun así, el avance de la AP enfrenta desafíos que no pueden ignorarse. Entre ellos destacan la brecha tecnológica, los costos iniciales de implementación, la limitada interoperabilidad entre plataformas, la insuficiencia de formación especializada, las restricciones institucionales y la necesidad de políticas públicas que promuevan una innovación realmente inclusiva. La tecnología, por sí sola, no garantiza transformación. Se requieren procesos de capacitación, acompañamiento técnico, infraestructura adecuada y marcos de gobernanza que permitan que los beneficios de la digitalización lleguen también a pequeños y medianos productores.

En consecuencia, esta obra no solo presenta herramientas y metodologías, sino que invita a pensar críticamente el futuro del agro. Un futuro en el que el profesional agrícola no se limite a interpretar mapas, índices espectrales o modelos predictivos, sino que comprenda los territorios, dia-

logue con las comunidades y actúe con responsabilidad ética frente a los sistemas vivos que gestiona. En esa dirección, la AP no debe reemplazar al ser humano ni al criterio agronómico; debe potenciarlos. Su mayor valor radica en convertir la información en conocimiento útil, el conocimiento en decisiones oportunas y las decisiones en prácticas más justas, eficientes y sostenibles.

Este libro es, por tanto, una invitación a comprender la AP no solo como un conjunto de innovaciones, sino como una oportunidad para reconfigurar la relación entre ciencia, tecnología, territorio y producción. En un tiempo marcado por la incertidumbre climática y la presión sobre los recursos naturales, cultivar con precisión significa también cultivar con responsabilidad. Significa producir mejor, con mayor eficiencia y menor impacto, sin perder de vista que el verdadero sentido de la innovación agrícola sigue estando en el cuidado de la tierra y en el bienestar de quienes la trabajan.

Capítulo 1

Introducción a la Agricultura de Precisión - AP



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. **Comprender** los fundamentos conceptuales, técnicos y agronómicos que sustentan AP como enfoque de gestión diferenciada en sistemas productivos agrícolas, agroforestales y ambientales.

2. **Analizar** la variabilidad espacial y temporal de los agroecosistemas como principio central de la AP, reconociendo su influencia sobre la productividad, el uso de insumos y la sostenibilidad del sistema.

3. **Identificar e interpretar** las principales tecnologías empleadas en la AP, incluyendo sensores, sistemas de posicionamiento global, teledetección, plataformas SIG, Internet de las Cosas e inteligencia artificial, valorando su función en la toma de decisiones agronómicas.

4. **Relacionar** la aplicación de la AP con el manejo eficiente de suelo, agua, nutrientes y cultivos, considerando su aporte al mejoramiento del rendimiento, la calidad de la producción y la reducción del impacto ambiental.

5. **Evaluar** las posibilidades de implementación de la AP en distintos contextos rurales, con énfasis en sistemas agrícolas y agroforestales de Colombia y América Latina, reconociendo sus beneficios, limitaciones y desafíos operativos.

6. **Valorar críticamente** el papel de la AP en la construcción de sistemas agroproductivos más resilientes, sostenibles e inclusivos, articulando innovación tecnológica, conocimiento local y adaptación territorial.

Conceptos clave

- Agricultura de precisión (AP): Enfoque de gestión agrícola basado en la identificación, análisis y manejo de la variabilidad espacial y temporal dentro de un sistema productivo, con el fin de optimizar el uso de insumos, mejorar el rendimiento, incrementar la rentabilidad y reducir el impacto ambiental.

- Variabilidad espacial: Diferencias que se presentan dentro de un mismo lote o unidad productiva en propiedades del suelo, relieve, humedad, fertilidad, vigor del cultivo o incidencia de plagas. Constituye la base para el manejo sitio-específico.

- Variabilidad temporal: Cambios que ocurren en el tiempo dentro del sistema agrícola, asociados a factores como clima, fenología del cultivo, disponibilidad hídrica, dinámica de nutrientes o presión fitosanitaria.

- Manejo sitio-específico: Estrategia de intervención agronómica que ajusta prácticas como fertilización, riego, siembra o control fitosanitario según las condiciones particulares de cada zona del predio.

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS/GNSS): Tecnología de georreferenciación que permite ubicar con precisión puntos, trayectorias, maquinaria y áreas de manejo dentro del terreno agrícola, facilitando la generación de mapas y la aplicación variable de insumos.

- Sistemas de Información Geográfica (SIG): Plataformas tecnológicas que permiten almacenar, analizar, interpretar y visualizar datos espaciales provenientes de suelos, cultivos, clima, relieve y manejo agronómico.

- Teledetección: Técnica de obtención de información de la superficie terrestre sin contacto directo, mediante sensores instalados en satélites, drones, aeronaves u otras plataformas, útil para monitorear el estado del cultivo y la variabilidad del terreno.

- Sensores remotos: Dispositivos que capturan información a distancia sobre el cultivo o el suelo, generalmente a través de la reflectancia o la emisión de radiación electromagnética.

- Sensores proximales: Dispositivos que miden directamente variables del suelo, la planta o el ambiente en campo, como humedad, temperatura, conductividad eléctrica, pH o contenido de nutrientes.

- Monitor de rendimiento: Sistema instalado en maquinaria de cosecha que registra la producción georreferenciada durante la recolección, permitiendo generar mapas de rendimiento y analizar la variabilidad productiva dentro del lote.

- Mapa de rendimiento: Representación espacial de la productividad del cultivo dentro de una parcela, construida a partir de datos georreferenciados de cosecha. Permite identificar zonas de alto, medio y bajo desempeño productivo.

- Mapa de prescripción: Documento digital georreferenciado que contiene instrucciones específicas sobre la dosis o intensidad de aplicación de un insumo en diferentes zonas del predio.

- Aplicación de tasa variable (VRT): Tecnología que permite modificar automáticamente la cantidad de insumo aplicado —como semilla, fertilizante, agua o agroquímicos— según la variabilidad espacial del terreno y las necesidades del cultivo.

- Zona de manejo: Área relativamente homogénea dentro del predio, definida a partir de atributos productivos, edáficos, topográficos o fisiológicos, que recibe un manejo agronómico diferenciado.

- Internet de las Cosas (IoT): Red de dispositivos conectados que recopilan, transmiten y procesan datos en tiempo real, permitiendo el monitoreo continuo y la automatización de procesos agrícolas.

- Big data agrícola: Conjunto masivo y diverso de datos generados por sensores, estaciones meteorológicas, maquinaria, imágenes satelitales, plataformas digitales y registros históricos, cuyo análisis permite apoyar decisiones estratégicas en el agro.

- Inteligencia artificial (IA): Conjunto de métodos computacionales capaces de analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones, generar predicciones y apoyar decisiones agronómicas más precisas y oportunas.

- Aprendizaje automático (Machine Learning): Rama de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender a partir de datos históricos y generar modelos predictivos para rendimiento, enfermedades, estrés hídrico o manejo nutricional.

- Índice de vegetación: Relación matemática derivada de bandas espectrales captadas por sensores remotos, utilizada para estimar vigor, biomasa, contenido de clorofila o estrés en la vegetación.

- NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): Índice espectral ampliamente utilizado en AP para evaluar el vigor de la vegetación a partir de la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano y la del rojo visible.

- Conductividad eléctrica aparente (CEa): Variable del suelo relacionada con textura, humedad, salinidad y contenido de arcilla

o materia orgánica. Se usa para identificar patrones de variabilidad y delimitar zonas de manejo.

- Interoperabilidad: Capacidad de diferentes dispositivos, sensores, plataformas y sistemas digitales para intercambiar información de manera compatible, coherente y funcional.

- Agricultura digital: Evolución de la AP que integra sensores, conectividad, automatización, inteligencia artificial, analítica de datos y plataformas digitales para una gestión agrícola integral.

- Sostenibilidad agrícola: Capacidad del sistema productivo para mantener su funcionamiento y productividad en el tiempo, utilizando eficientemente los recursos naturales, reduciendo impactos ambientales y fortaleciendo la resiliencia económica y social.

- Resiliencia agroecosistémica: Capacidad de un sistema agrícola o agroforestal para resistir, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones como sequías, plagas, cambios de mercado o eventos climáticos extremos.

Desarrollo técnico

Introducción a la agricultura de precisión

Desde finales del siglo XX, la incorporación de tecnologías avanzadas al sector agropecuario ha transformado de manera sustancial la forma de gestionar los sistemas productivos. En este contexto, la AP se ha consolidado como un enfoque técnico y estratégico orientado a optimizar los procesos agrícolas mediante el análisis de la variabilidad espacial y temporal del terreno, con el propósito de mejorar el rendimiento, la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental de cada unidad de producción (Stafford, 2000; Zhang et al., 2002; Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

En sus primeras etapas, la AP se apoyó principalmente en herramientas como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permitieron identificar diferencias intra prediales en atributos edáficos, hídricos y productivos. Posteriormente, la integración de sensores remotos, drones, plataformas automatizadas, redes de monitoreo y algoritmos de aprendizaje automático amplió notablemente la capacidad de observación y respuesta del sistema agrícola, haciendo posible una monitorización más precisa y, en muchos casos, en tiempo real del estado del suelo y del cultivo (Stafford, 2000; Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Chlingaryan et al., 2018).

A escala internacional, la adopción de tecnologías asociadas a la AP ha mostrado efectos favorables sobre la eficiencia en el uso de insumos, la reducción de costos operativos y la mitigación de impactos ambientales, especialmente cuando se aplican estrategias de manejo diferencial para agua, fertilizantes y fitosanitarios. No obstante, esta transición tecnológica también enfrenta limitaciones relevantes, entre ellas los altos costos iniciales, la brecha de alfabetización digital, la limitada conectividad rural y la necesidad de modelos de adopción más inclusivos para productores de pequeña y mediana escala (Gebbers & Adamchuk, 2010; Trendov et al., 2019; FAO, 2022; Balafoutis et al., 2017).

En este sentido, la AP no debe entenderse únicamente como un conjunto de dispositivos o software, sino como una plataforma integral de gestión agronómica basada en información. Su valor radica en articular conocimiento técnico, observación del territorio, modelación de datos e innovación digital para orientar decisiones más oportunas, eficientes y ambientalmente responsables. Bajo esta lógica, la AP representa una vía concreta para avanzar hacia una agricultura más precisa, resiliente y sostenible, especialmente en territorios donde el uso racional de los recursos naturales es una condición indispensable para la permanencia productiva (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Gebbers & Adamchuk, 2010).

Palabras clave: agricultura de precisión, inteligencia artificial, Internet de las Cosas, sostenibilidad agrícola, aplicación variable de insumos.

Preguntas guía

- ¿Cuáles son los fundamentos técnicos y científicos que estructuran la AP?
- ¿Qué tecnologías son prioritarias para una implementación eficaz de la AP en sistemas agrícolas diversos?
- ¿Cómo contribuye la AP a una gestión ambientalmente responsable del agro?
- ¿Qué ventajas económicas ofrece la AP a los productores en contextos rurales?
- ¿Qué condiciones deben garantizarse para una adopción efectiva de estas tecnologías en zonas con limitaciones estructurales?
- ¿Qué estrategias podrían facilitar su adaptación a sistemas de pequeña y mediana escala?

1. Contexto y relevancia de la agricultura de precisión en el siglo XXI

En el siglo XXI, la agricultura enfrenta desafíos de gran complejidad: crecimiento demográfico sostenido, urbanización acelerada, degradación de recursos naturales, escasez hídrica y efectos cada vez más notorios del cambio climático. Frente a este escenario, la AP ha emergido como una respuesta científica y tecnológica que busca integrar información agronómica, geoespacial y ambiental para mejorar la eficiencia del manejo productivo sin comprometer la base ecológica que sostiene la producción (FAO, 2022; Gebbers & Adamchuk, 2010).

Más que una suma de herramientas, la AP constituye una filosofía de manejo sustentada en el reconocimiento de que los lotes agrícolas no son homogéneos. Cada unidad productiva expresa variaciones internas en fertilidad, humedad, textura, compactación, vigor vegetal y respuesta a insumos. Por ello, la lógica de la AP consiste en reemplazar las decisiones uniformes por intervenciones diferenciadas, ajustadas a la realidad biofísica de cada zona del predio. Esta perspectiva permite optimizar recursos, reducir pérdidas y fortalecer la sostenibilidad técnica y económica del sistema productivo (Stafford, 2000; Zhang et al., 2002; Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

Los avances en GPS, SIG, sensores remotos, imágenes satelitales, drones y análisis computacional han transformado la forma de recolectar, interpretar y utilizar la información agrícola. Actualmente, la AP no solo permite mapear la variabilidad del suelo o del rendimiento, sino también monitorear en tiempo casi real el estado fisiológico del cultivo, anticipar riesgos y generar recomendaciones de manejo más precisas. La incorporación de inteligencia artificial, aprendizaje automático e Internet de las Cosas ha reforzado esta capacidad al facilitar la integración de múltiples fuentes de datos en esquemas de decisión más dinámicos y predictivos (Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Chlingaryan et al., 2018; Trendov et al., 2019).

En sistemas complejos, como los agroforestales o los de producción diversificada, la AP adquiere un valor adicional, ya que permite gestionar simultáneamente distintos componentes biológicos y espaciales del sistema. La posibilidad de integrar sensores de humedad, cartografía temática, imágenes multiespectrales y datos climáticos permite ajustar con mayor precisión el riego, la nutrición, la protección fitosanitaria y la planificación operativa, favoreciendo una mayor eficiencia sin deteriorar la biodiversidad funcional ni la estabilidad ecológica del sistema. Esta lógica de manejo sitio-específico amplía la pertinencia de la AP más allá de la agricultura extensiva convencional (Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Balafoutis et al., 2017).

Etapas operativas de la agricultura de precisión

La implementación de la AP suele organizarse en cuatro etapas complementarias. La primera corresponde a la **caracterización y diagnóstico**, que incluye la recolección de datos georreferenciados de suelo, cultivo y clima, así como la delimitación de zonas de manejo específico. La segunda es la **aplicación variable de insumos**, mediante la cual fertilizantes, agua o agroquímicos se suministran de forma diferenciada según las necesidades reales de cada sitio. La tercera etapa es el **monitoreo continuo**, basado en sensores, drones o imágenes satelitales, que permite detectar cambios en vigor, estrés o sanidad del cultivo. Finalmente, la cuarta etapa es la **automatización**, donde los datos se integran a equipos y plataformas capaces de ejecutar decisiones de manejo con mayor rapidez y precisión (Stafford, 2000; Balafoutis et al., 2017; Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

Pese a sus ventajas, la expansión de la AP sigue condicionada por barreras técnicas, económicas e institucionales. La conectividad limitada en áreas rurales, el costo de adquisición y mantenimiento de los equipos, la falta de interoperabilidad entre plataformas y la necesidad de formación especializada continúan restringiendo su adopción, especialmente en regiones en desarrollo. No obstante, la aparición de sensores de menor costo, servicios en la nube, plataformas abiertas y herramientas digitales más accesibles está reduciendo parte de estas limitaciones y ampliando las posibilidades de uso en sistemas de menor escala (Trendov et al., 2019; FAO, 2022).

En consecuencia, la AP se perfila como un componente estratégico para enfrentar los retos del agro contemporáneo. Su valor no reside solo en incrementar la productividad, sino en contribuir a una agricultura más eficiente en el uso de insumos, más sensible a la variabilidad ambiental y mejor preparada para responder a contextos de incertidumbre climática y presión sobre los recursos. En esa transición, el papel de los profesionales del agro resulta central, pues son ellos quienes deben integrar conocimiento

agronómico, análisis espacial y criterio territorial para convertir la tecnología en decisiones pertinentes y sostenibles (Gebbers & Adamchuk, 2010; FAO, 2022).

2. Fundamentos conceptuales de la agricultura de precisión

La AP representa un enfoque de manejo que combina herramientas tecnológicas, análisis de datos y criterios agronómicos para responder a la heterogeneidad inherente de los agroecosistemas. A diferencia del manejo convencional, que tiende a considerar el lote como una unidad homogénea, la AP parte del supuesto de que la variabilidad espacial y temporal del suelo, el cultivo y el ambiente condiciona de manera directa la productividad y la eficiencia del sistema. Por ello, su objetivo fundamental consiste en adaptar las decisiones de manejo a esa variabilidad, en lugar de imponer esquemas uniformes de intervención (Stafford, 2000; Zhang et al., 2002).

Esa variabilidad puede expresarse en múltiples dimensiones: diferencias en textura, profundidad efectiva, contenido de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, capacidad de retención de agua, microrelieve, temperatura, radiación o vigor fisiológico del cultivo. La identificación de estas diferencias es posible mediante la combinación de sensores de campo, imágenes aéreas, plataformas satelitales, GPS y SIG, los cuales permiten construir mapas de variabilidad y generar una representación espacialmente explícita del comportamiento del sistema productivo, en la figura 1 solo observmaos un terreno normal pero en la figura 2 da una visión del mismo terreno pero con ojos diferentes. Sobre esta base se elaboran mapas de prescripción que orientan decisiones más precisas en fertilización, riego, control fitosanitario y cosecha (Zhang et al., 2002; Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

Uno de los pilares conceptuales de la AP es, por tanto, la gestión diferenciada. Esto significa que los insumos no se aplican de manera uniforme, sino en función de las necesidades específicas de cada zona del campo. Esta lógica mejora la eficiencia en el uso de recursos, reduce

pérdidas por lixiviación, escorrentía o sobredosificación, y fortalece la sostenibilidad ambiental del sistema. Al mismo tiempo, incrementa la capacidad de respuesta del productor ante situaciones de estrés hídrico, deficiencias nutricionales o brotes fitosanitarios, al permitir intervenciones más oportunas y focalizadas (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Balafoutis et al., 2017).

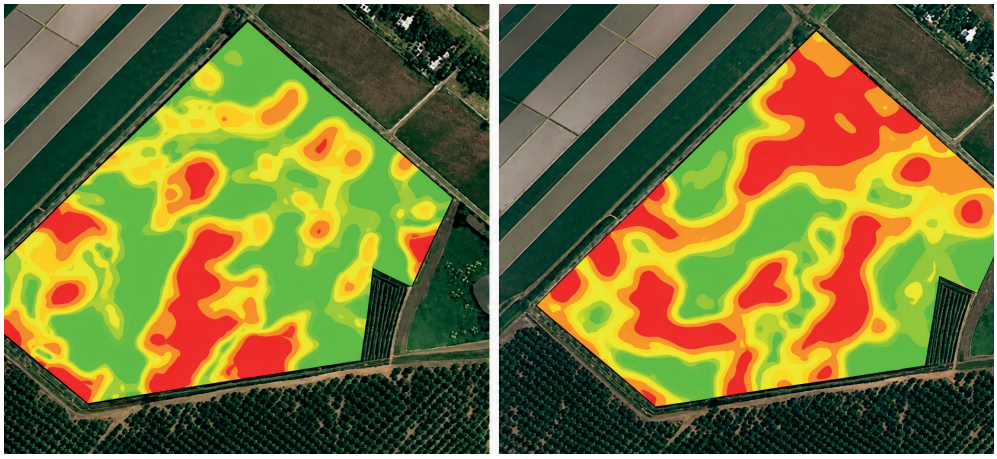
En la actualidad, este enfoque ha evolucionado hacia esquemas de agricultura dirigida por información, donde el valor ya no reside solo en captar datos, sino en interpretarlos de manera útil para la toma de decisiones. En este punto, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático cumplen un papel decisivo, pues permiten reconocer patrones complejos, integrar series históricas, anticipar escenarios y generar recomendaciones agronómicas más ajustadas a la dinámica real del sistema. Así, la AP avanza desde una agricultura descriptiva hacia una agricultura predictiva y prescriptiva, en la que los datos se transforman en conocimiento operativo (Chlingaryan et al., 2018; Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

Figura 1. *Terreno normal sembrado*



Fuente: Esta Investigación

Figura 2. *Mapa de variabilidad espacial de materia orgánica del suelo*



Fuente: Esta Investigación

Otro principio central es la retroalimentación continua. La AP no constituye una intervención aislada, sino un proceso iterativo de observación, análisis, decisión y ajuste. Los datos generados en cada ciclo productivo alimentan las decisiones del siguiente, permitiendo afinar progresivamente las estrategias de manejo. Esta capacidad de aprendizaje acumulativo fortalece la resiliencia del sistema frente a la variabilidad climática, las fluctuaciones del mercado y los cambios en la respuesta del cultivo, lo que resulta particularmente valioso en territorios donde la producción depende de condiciones biofísicas altamente cambiantes (Gebbers & Adamchuk, 2010; FAO, 2022).

Sin embargo, la adopción efectiva de la AP exige condiciones habilitantes que no siempre están presentes en los territorios rurales. La inversión inicial, la conectividad digital, la alfabetización tecnológica, la capacidad de análisis y el acompañamiento técnico siguen siendo factores decisivos para su implementación. De ahí que la democratización de la AP dependa no solo del desarrollo de nuevas tecnologías, sino también de políticas, infraestructura, formación y esquemas de innovación adaptados a contextos rurales diversos (Trendov et al., 2019; FAO, 2022).

En síntesis, la AP ofrece una vía concreta para avanzar hacia sistemas agropecuarios más inteligentes, eficientes y sostenibles. Su importancia radica en que permite gestionar la complejidad productiva con mayor rigor técnico, reducir el uso ineficiente de insumos y fortalecer la capacidad adaptativa del agro frente a los desafíos contemporáneos. En un contexto marcado por la necesidad de producir más con menos recursos y menor impacto ambiental, la AP se consolida como una herramienta clave para la innovación rural y la sostenibilidad del sector agropecuario (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Gebbers & Adamchuk, 2010; Balafoutis et al., 2017).

La identificación y el manejo de la variabilidad intrapredio constituyen el punto de partida de la AP, y es la tecnología la que aporta la "lupa" con la que hoy se examinan los campos. Plataformas aéreas no tripuladas, sensores proximales e imágenes satelitales generan flujos de datos multiespectrales que revelan diferencias en contenido de materia orgánica, humedad o vigor de la cobertura vegetal que antes permanecían invisibles al ojo humano (Stafford, 2000; Chlingaryan et al., 2018). A partir de esa información se elaboran mapas de variabilidad que delimitan zonas de manejo específico, de modo que cada franja del terreno reciba exactamente los recursos que necesita para expresar su potencial productivo.

Sobre esa base se asienta un segundo pilar: la toma de decisiones guiada por datos. Frente a los métodos tradicionales apoyados en la intuición y la experiencia acumulada, la AP introduce un paradigma cuantitativo en el que sensores de suelo, estaciones meteorológicas conectadas y algoritmos de aprendizaje automático convierten observaciones puntuales en diagnósticos de alta resolución espaciotemporal (SaizRubio & RoviraMás, 2020). Así, el agricultor puede ajustar en tiempo real la dosis de riego o fertilización; del mismo modo, la termografía aérea o los índices de vegetación permiten detectar estrés biótico o abiótico antes de que los síntomas sean visibles, ganando un margen crítico para intervenir y reducir pérdidas.

El tercer principio, uso eficiente de insumos, se resume en "la cantidad correcta, en el lugar correcto y en el momento preciso". La aplicación variable de fertilizantes basada en mapas de prescripción evita la sobreenmienda

de suelos ya enriquecidos y, por tanto, minimiza el riesgo de lixiviación de nitratos o fosfatos hacia cuerpos de agua; los sistemas de riego sectorizado conservan volúmenes significativos de agua y atenúan la erosión asociada a láminas excesivas (Balafoutis et al., 2017). Tales prácticas, al reducir costos operativos, inciden directamente en la rentabilidad de la empresa agrícola.

La sostenibilidad ambiental articula el cuarto principio y otorga legitimidad social a la AP. Ajustar la dosis de nitrógeno a la demanda real del cultivo disminuye las emisiones de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento muy superior al del CO_2 (Delgado et al., 2011). Al mismo tiempo, el monitoreo continuo del estado del suelo y la vegetación fomenta estrategias de manejo que preservan la biodiversidad funcional y la calidad del agua, aspectos críticos para la resiliencia de los agroecosistemas ante el cambio climático (FAO, 2023).

La convergencia de estos cuatro principios: Variabilidad, decisiones basadas en datos, eficiencia de insumos y sostenibilidad, ofrece un marco robusto para transformar la agricultura en una actividad climáticamente inteligente y competitiva. Profesionales del agro como ingenieros agrónomos y agroforestales actúan como "traductores" entre la sofisticación tecnológica y la realidad del campo, adaptando herramientas de AP a condiciones locales y acompañando procesos de capacitación que harán viable su adopción. Junto al avance de sensores de bajo costo, redes IoT y servicios en la nube, el respaldo de políticas públicas e inversiones en innovación y desarrollo - I+D determinará la velocidad con que la AP consolide sistemas productivos capaces de equilibrar seguridad alimentaria y salud ambiental. En última instancia, incorporar estos principios no solo redefine la gestión agrícola presente, sino que sienta las bases de un modelo agroalimentario más resistente, inclusivo y sostenible para las generaciones venideras.

3. Principios fundamentales de la agricultura de precisión

Diversos autores coinciden en que la AP se estructura sobre cuatro principios interdependientes que, más que postulados tecnológicos aislados, configuran una estrategia integral para responder a los desafíos productivos,

económicos y ambientales del agro contemporáneo, incluidos los contextos rurales de Colombia y América Latina (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Gebbers & Adamchuk, 2010; Pérez-Ortega et al., 2022).

I. Reconocimiento científico de la variabilidad: La AP parte del principio de que los sistemas agrícolas no son homogéneos, sino espacial y temporalmente variables. Dentro de una misma finca pueden coexistir diferencias marcadas en textura, relieve, humedad, fertilidad, conductividad eléctrica aparente y respuesta productiva del cultivo. Reconocer esa heterogeneidad permite delimitar zonas de manejo y superar el paradigma del "promedio", que suele conducir a decisiones ineficientes. En este sentido, la caracterización de ambientes productivos constituye la base técnica del manejo sitio-específico y la primera condición para intervenir con mayor precisión y menor desperdicio (Kitchen et al., 2005; Gebbers & Adamchuk, 2010).

II. Toma de decisiones informada por datos: Otro principio central de la AP es que las decisiones agronómicas deben sustentarse en información objetiva y georreferenciada. Sensores de campo, estaciones meteorológicas automáticas, plataformas satelitales, drones y sistemas de monitoreo continuo generan flujos de datos que, una vez procesados, se traducen en mapas de prescripción, índices de vegetación, alertas tempranas y sistemas de apoyo a la decisión. Así, labores como la fertilización diferencial, el riego ajustado o la cosecha selectiva dejan de depender únicamente de la intuición y pasan a fundamentarse en evidencia espacial y temporalmente explícita, lo que incrementa la capacidad de respuesta del productor frente a la variabilidad del sistema (Gebbers & Adamchuk, 2010; Fassa et al., 2022).

III. Uso eficiente y racional de insumos: La aplicación variable de nutrientes, el riego inteligente y el manejo localizado de plagas y enfermedades constituyen expresiones operativas de este principio. Su propósito es ajustar la dosis, el momento y el lugar de aplicación de cada insumo a las necesidades reales del sistema productivo. La evidencia disponible muestra que este enfoque puede reducir el desperdicio de fertilizantes y otros insumos, mejorar la eficiencia económica y disminuir

impactos ambientales sin comprometer necesariamente el rendimiento. Por ejemplo, en maíz, los sistemas de recomendación sitio-específica de nitrógeno han mostrado ahorros potenciales promedio cercanos al 12 % frente al manejo uniforme, mientras que las tecnologías de AP en conjunto se asocian con mejoras en productividad y desempeño económico junto con menores externalidades ambientales (Balafoutis et al., 2017; Fassa et al., 2022).

IV. Sostenibilidad y resiliencia socioambiental: La AP no solo busca producir más, sino producir mejor, con mayor eficiencia ecológica y mayor capacidad adaptativa. Al optimizar el uso del agua, reducir pérdidas por lixiviación o escorrentía, conservar la estructura del suelo y minimizar aplicaciones innecesarias, este enfoque se articula con la lógica de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente con la meta 2.4, orientada a garantizar sistemas de producción agrícola sostenibles y resilientes, y con la meta 12.2, centrada en la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales. En consecuencia, la AP contribuye a fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas frente al cambio climático y a promover sistemas alimentarios más sostenibles en el largo plazo (United Nations, 2023).

4. Herramientas tecnológicas clave

A continuación, se presentan las herramientas más empleadas en AP **(ver tabla 1);**

Tabla 1. *Herramientas tecnológicas clave para la agricultura de precisión*

Herramienta	Aplicación Principal
GPS	Georreferenciación de puntos de muestreo y maquinaria
Sensores remotos	Análisis de salud vegetal, humedad del suelo
Drones	Fotogrametría, monitoreo multiespectral

Herramienta	Aplicación Principal
SIG	Análisis espacial, mapas de prescripción
Estaciones agroclimáticas	Monitoreo en tiempo real de variables climáticas
Plataformas de datos	Procesamiento e interpretación de grandes volúmenes de datos (Big Data)

Fuente: Esta investigación

5. Aplicación de la Agricultura de Precisión en sistemas agrícolas, agroforestales y ambientales

La AP se ha consolidado como un enfoque de gestión que integra datos espaciales, temporales y operativos para apoyar decisiones agronómicas orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad. En este marco, su articulación con los sistemas agroforestales resulta especialmente pertinente, ya que ambos enfoques comparten principios de manejo basados en la diversificación, la resiliencia y la optimización ecológica del territorio. La digitalización aplicada a la agroforestería permite, además, trasladar el potencial de la AP hacia sistemas más complejos, donde conviven árboles, cultivos y, en muchos casos, componentes pecuarios.

La agroforestería, por su parte, ofrece beneficios ampliamente reconocidos para la sostenibilidad productiva y ambiental. La presencia de árboles en el sistema favorece la regulación de procesos edáficos e hídricos, contribuye al almacenamiento de carbono, fortalece la biodiversidad funcional y reduce la vulnerabilidad frente a perturbaciones climáticas y económicas. Esta combinación de funciones productivas y ecosistémicas explica por qué los sistemas agroforestales han sido valorados como alternativas estratégicas para avanzar hacia modelos agrícolas más sostenibles y resilientes.

La integración de herramientas de AP en estos sistemas permite abordar con mayor exactitud la heterogeneidad espacial y funcional que los caracteriza. El uso de sensores de suelo, imágenes satelitales, drones, redes IoT y sistemas de información geográfica facilita el monitoreo del estado hídrico, nutricional y fisiológico de cultivos y árboles, así como la delimitación de zonas de manejo y la planificación diferenciada del riego, la fertilización y otras labores. En este sentido, la digitalización no sustituye la lógica agroforestal, sino que la potencia al ofrecer información más precisa para la toma de decisiones en escenarios complejos.

En el caso colombiano, esta convergencia resulta especialmente relevante en cadenas como la del cacao, donde buena parte de la producción se desarrolla en arreglos agroforestales y donde la innovación tecnológica ha sido identificada como un eje prioritario de competitividad y sostenibilidad. Estudios recientes muestran, por un lado, el valor económico y ambiental de los sistemas agroforestales cacaoteros en el suroccidente colombiano y, por otro, el creciente uso de enfoques basados en datos y aprendizaje automático para mejorar la selección de sitios, la comprensión de variables ambientales y la formulación de recomendaciones agronómicas para el establecimiento del cultivo. En conjunto, estos avances evidencian que la digitalización puede fortalecer la planificación y el manejo de sistemas agroforestales tropicales sin desligarlos de sus funciones ecológicas.

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías sigue enfrentando limitaciones estructurales importantes. El costo de inversión, la falta de conectividad adecuada, la brecha de habilidades digitales y la ausencia de entornos habilitantes continúan siendo barreras significativas, especialmente para pequeños y medianos productores rurales. Por ello, la expansión de la AP en sistemas agrícolas y agroforestales no depende únicamente del desarrollo tecnológico, sino también de la existencia de políticas públicas, procesos de formación, infraestructura digital y esquemas de innovación adaptados a los contextos territoriales.

A pesar de estas restricciones, el panorama es favorable. La aparición de sensores más asequibles, plataformas abiertas, servicios en la nube y

aplicaciones de inteligencia artificial está ampliando progresivamente las posibilidades de acceso a la agricultura digital. En sistemas agroforestales, esta tendencia puede traducirse en mejores capacidades de monitoreo, diagnóstico y predicción, así como en un manejo más eficiente de la interacción entre suelo, vegetación, agua y clima. En consecuencia, la integración entre AP y agroforestería se perfila como una estrategia coherente para enfrentar desafíos como la degradación del suelo, la variabilidad climática y la necesidad de producir con mayor eficiencia ecológica.

En síntesis, la aplicación de la AP en sistemas agrícolas, agroforestales y ambientales representa una oportunidad estratégica para transformar la heterogeneidad del territorio en una base de manejo más eficiente, adaptativa y sostenible. Al articular innovación tecnológica, conocimiento agronómico y funciones ecosistémicas, esta convergencia favorece sistemas productivos capaces de sostener la productividad, mejorar los medios de vida rurales y conservar los recursos naturales de los que depende la seguridad alimentaria de largo plazo.

6. Beneficios y retos de la agricultura de precisión

La AP se ha consolidado como una estrategia de transformación tecnológica para la producción agropecuaria, al integrar sensores, sistemas de posicionamiento, plataformas geoespaciales, automatización y analítica de datos con el fin de ajustar las decisiones de manejo a la variabilidad real del sistema productivo. Este enfoque permite pasar de esquemas uniformes de intervención a prácticas sitio-específicas, con implicaciones directas sobre la eficiencia en el uso de recursos, la productividad y la sostenibilidad ambiental. En ese sentido, la AP no debe entenderse únicamente como un conjunto de herramientas, sino como un modelo de gestión basado en información para optimizar la relación entre suelo, cultivo, clima y decisión agronómica (Gebbers & Adamchuk, 2010; Government Accountability Office, 2024).

6.1 Beneficios de la agricultura de precisión

Uno de los principales beneficios de la AP es la **optimización del uso de insumos**. La aplicación localizada y ajustada de fertilizantes, pesticidas y agua reduce desperdicios y mejora la eficiencia de uso de nutrientes e insumos hídricos, al tiempo que disminuye pérdidas por lixiviación, escorrentía y sobredosificación. Esto se traduce en una producción más eficiente y en una menor presión sobre los ecosistemas agrícolas y los cuerpos de agua cercanos (Balafoutis et al., 2017; Government Accountability Office, 2024). Otro beneficio ampliamente reportado es el **incremento del rendimiento y la mejora de la productividad**. Al adaptar las prácticas agronómicas a las necesidades específicas de cada zona del campo, la AP favorece un manejo más oportuno del cultivo, mejora la respuesta a limitantes locales y puede contribuir tanto a la cantidad como a la calidad de la producción. En consecuencia, este enfoque fortalece la capacidad del productor para gestionar la variabilidad espacial y temporal del predio con mayor exactitud (Gebbers & Adamchuk, 2010; Papadopoulos et al., 2024).

La AP también puede generar una **reducción de costos operativos**, especialmente cuando las tecnologías se integran en esquemas de automatización, monitoreo continuo y aplicación variable. El uso más racional de insumos, la disminución de intervenciones innecesarias y la posibilidad de ajustar operaciones de campo con base en datos permiten reducir costos asociados a mano de obra, energía, insumos y desgaste operativo, mejorando la rentabilidad del sistema productivo (Balafoutis et al., 2017; Papadopoulos et al., 2024).

Un beneficio adicional es la **mejora en la calidad del producto**, ya que el seguimiento constante del estado del cultivo y la intervención precisa sobre agua, nutrición y sanidad favorecen una mayor homogeneidad, mejor condición fisiológica y, en muchos casos, un mayor valor comercial. Si bien estos resultados dependen del cultivo, del contexto y del nivel de integración tecnológica, la evidencia sugiere que la precisión en el manejo puede contribuir a una producción de mejor calidad y con mayor trazabilidad (Government Accountability Office, 2024; Gebbers & Adamchuk, 2010).

Finalmente, la AP aporta a la **sostenibilidad ambiental** al reducir el uso excesivo de agroquímicos, optimizar el manejo del agua y disminuir externalidades negativas sobre suelo, biodiversidad y calidad del agua. Por ello, suele considerarse una herramienta con potencial para apoyar sistemas agroalimentarios más sostenibles, siempre que su implementación vaya acompañada de criterios técnicos, regulación adecuada y condiciones de acceso equitativas (Balafoutis et al., 2017; FAO, 2019).

6.2 Retos en la implementación de la agricultura de precisión

Pese a sus ventajas, la AP enfrenta **altos costos iniciales**, lo que sigue siendo una barrera importante para pequeños y medianos productores. La adquisición de sensores, drones, estaciones meteorológicas, software especializado, servicios de conectividad y maquinaria compatible con aplicaciones variables exige inversiones que no siempre son viables en contextos de agricultura familiar o en regiones con menor acceso al crédito y a la innovación tecnológica (Government Accountability Office, 2024; FAO, 2019).

A ello se suma la **necesidad de capacitación técnica especializada**. La operación adecuada de estas herramientas demanda competencias en manejo de sensores, interpretación de mapas, análisis de datos y toma de decisiones agronómicas basadas en evidencia. Sin formación suficiente, muchas tecnologías pueden subutilizarse o generar decisiones inadecuadas, lo que limita el retorno de la inversión y reduce la confianza del productor en estos sistemas (FAO, 2019; Government Accountability Office, 2024).

Otro reto central es la **conectividad limitada en zonas rurales** es la conectividad móvil o el acceso a plataformas en la nube, condiciones que no siempre están garantizadas en territorios apartados. La FAO ha señalado que la transformación digital del agro requiere infraestructura, asequibilidad, educación e institucionalidad adecuadas; sin estos habilitadores, la adopción tecnológica tiende a profundizar desigualdades preexistentes entre productores y territorios (FAO, 2019). Asimismo, persiste la **complejidad**

en la integración de tecnologías, especialmente por problemas de interoperabilidad entre dispositivos, plataformas y formatos de datos. La ausencia de estándares homogéneos puede dificultar la compatibilidad entre equipos, limitar la integración de información y aumentar la complejidad del análisis. Esta fragmentación tecnológica representa un desafío tanto para los usuarios como para desarrolladores, proveedores y responsables de políticas públicas (Government Accountability Office, 2024).

Por último, existen **preocupaciones sobre la privacidad, la seguridad y la gobernanza de los datos agrícolas**. La recopilación continua de información sobre prácticas productivas, rendimientos, ubicación y desempeño del predio ha abierto debates sobre control, uso comercial, acceso y protección de esos datos. Organismos internacionales han advertido que el desarrollo digital del agro requiere marcos de gobernanza que equilibren la innovación con la confianza, la seguridad y los derechos de los productores sobre la información generada en sus fincas (OECD, 2020; Government Accountability Office, 2024).

En síntesis, la AP ofrece beneficios significativos en eficiencia, productividad, calidad y sostenibilidad, pero su implementación exitosa depende de condiciones habilitantes que van más allá de la tecnología misma. Infraestructura digital, formación técnica, financiamiento accesible, interoperabilidad y gobernanza de datos son elementos esenciales para que sus ventajas puedan materializarse de manera equitativa y sostenible en distintos contextos productivos (FAO, 2019; Government Accountability Office, 2024).

7. Estrategias para superar las limitaciones de la agricultura de precisión

La superación de las limitaciones asociadas a la agricultura de precisión requiere una estrategia integral que no se limite a la adquisición de equipos, sino que articule infraestructura, formación técnica, financiamiento, gobernanza de datos, interoperabilidad tecnológica y apropiación social. La evidencia internacional muestra que las tecnologías de AP pueden mejorar

la eficiencia en el uso de agua, fertilizantes y otros insumos, además de generar beneficios económicos y ambientales; sin embargo, su adopción sigue restringida por altos costos iniciales, complejidad técnica y desigualdades en el acceso tecnológico, especialmente para pequeños y medianos productores (Balafoutis et al., 2017; U.S. Government Accountability Office, 2024).

Una primera estrategia consiste en promover modelos de acceso compartido a la tecnología, como bancos de maquinaria, centros rurales de servicios tecnológicos, cooperativas de drones, laboratorios móviles de análisis de suelo y esquemas de alquiler de sensores o estaciones meteorológicas. Este enfoque permite reducir la barrera de inversión individual y facilita que pequeños productores accedan a servicios de georreferenciación, monitoreo multiespectral, mapas de prescripción y análisis de datos sin asumir el costo total de los equipos. Gebbers y Adamchuk (2010) plantean que la AP tiene potencial para contribuir a la seguridad alimentaria cuando se orienta al manejo eficiente de recursos y a la sostenibilidad de la producción; por tanto, su democratización debe apoyarse en mecanismos colectivos que permitan ampliar su cobertura más allá de los grandes productores.

La segunda estrategia debe centrarse en fortalecer la infraestructura digital rural. La conectividad, el acceso a energía confiable y la disponibilidad de redes móviles son condiciones básicas para que funcionen sensores IoT, plataformas en la nube, sistemas de monitoreo en tiempo real y aplicaciones de soporte a la decisión. Trendov et al. (2019) señalan que la transformación digital del agro depende de condiciones habilitantes como infraestructura, asequibilidad, educación e institucionalidad; en consecuencia, la AP debe incorporarse dentro de las agendas nacionales y territoriales de conectividad rural, extensión agropecuaria e innovación productiva. En Colombia, la Resolución 000096 de 2024 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural fortalece el marco técnico del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria, lo que puede servir como base para articular la AP con programas de asistencia técnica, transferencia tecnológica y extensión rural (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024).

Una tercera estrategia es la capacitación continua de productores, técnicos y extensionistas. La AP solo genera valor cuando los datos son interpretados con criterio agronómico; por ello, no basta con entregar drones, sensores o software si no existen capacidades para leer mapas, interpretar índices de vegetación, validar datos de campo y convertir la información en decisiones prácticas. Pérez-Ortega et al. (2022) identifican que la adopción de tecnologías de AP en Colombia depende de variables técnicas, económicas, sociales y educativas, lo cual confirma la necesidad de programas de formación en SIG, sensores, muestreo georreferenciado, estadística espacial, análisis de datos agrícolas y toma de decisiones sitio-específicas. Esta formación debe ser progresiva, contextualizada y práctica, de manera que el productor no sea un usuario pasivo de tecnología, sino un gestor informado de su propio sistema productivo.

La cuarta estrategia corresponde al diseño de tecnologías apropiadas, de bajo costo y adaptadas al contexto local. En territorios con baja conectividad, laderas pronunciadas, parcelas pequeñas o sistemas agroforestales diversificados, no siempre se requieren soluciones complejas de alto costo; en muchos casos, una combinación de GPS móvil, aplicaciones de código abierto, imágenes satelitales gratuitas, muestreo georreferenciado y análisis básico en QGIS puede generar decisiones suficientemente útiles. Balafoutis et al. (2017) muestran que las tecnologías de AP tienen efectos positivos sobre productividad, economía y mitigación ambiental cuando se aplican de forma adecuada; sin embargo, su pertinencia depende de seleccionar herramientas proporcionales al tamaño del predio, al cultivo, al nivel de mecanización y a la capacidad técnica disponible.

La quinta estrategia es mejorar la interoperabilidad entre plataformas, sensores y equipos. Una de las limitaciones más frecuentes de la AP es que los datos generados por maquinaria, drones, estaciones meteorológicas, sensores de suelo y programas de análisis no siempre son compatibles entre sí. Esta fragmentación dificulta integrar información, aumenta los costos de procesamiento y reduce la utilidad práctica de los datos. Wolfert et al. (2017) advierten que el uso de Big Data en agricultura inteligente requiere

infraestructuras capaces de conectar actores, datos y decisiones a lo largo de la cadena agroalimentaria; por ello, se deben promover estándares abiertos, formatos comunes de intercambio, plataformas interoperables y protocolos claros para la captura, almacenamiento y análisis de información agrícola.

La sexta estrategia se relaciona con la gobernanza, privacidad y soberanía de los datos agrícolas. La información generada en una finca tiene valor productivo, económico y estratégico; por tanto, el productor debe conocer quién accede a sus datos, con qué finalidad se usan y qué beneficios recibe por compartirlos. Jouanjean et al. (2020) señalan que los arreglos poco claros sobre gobernanza de datos pueden debilitar la confianza de los agricultores y limitar la adopción de soluciones digitales. En consecuencia, la implementación de AP debe acompañarse de acuerdos transparentes sobre propiedad, acceso, uso, almacenamiento, protección y comercialización de datos, especialmente cuando intervienen empresas proveedoras de plataformas, aseguradoras, compradores o entidades financieras.

La séptima estrategia consiste en impulsar investigación aplicada, validación local y pilotos demostrativos. La resistencia al cambio disminuye cuando los productores observan resultados concretos en sus propias condiciones de suelo, clima, cultivo y mercado. Por ello, las universidades, centros de investigación, asociaciones de productores y entidades territoriales deben establecer parcelas demostrativas donde se comparen prácticas convencionales frente a estrategias de AP, como fertilización variable, riego inteligente, monitoreo satelital o detección temprana de plagas. Yost et al. (2017) evidenciaron que los sistemas de AP pueden tener impactos positivos de largo plazo sobre la producción de granos cuando se implementan de manera consistente; este tipo de evidencia debe complementarse con experiencias locales en cultivos estratégicos como cacao, café, arroz, caña, papa, aguacate y sistemas agroforestales tropicales.

La octava estrategia debe orientarse a integrar la AP con enfoques agroecológicos y de sostenibilidad. La precisión no debe entenderse únicamente como eficiencia tecnológica, sino como una forma de reducir

impactos ambientales, mejorar la salud del suelo, optimizar el uso del agua y disminuir pérdidas de nutrientes. Delgado et al. (2011) sostienen que las prácticas de conservación del suelo y del agua son fundamentales para mitigar y adaptarse al cambio climático; en este sentido, la AP puede fortalecer dichas prácticas al permitir diagnósticos más precisos, monitoreo continuo y manejo diferenciado de áreas vulnerables. Así, la AP puede pasar de ser una herramienta de intensificación productiva a convertirse en una estrategia de intensificación sostenible, especialmente cuando se articula con coberturas vegetales, bioinsumos, agroforestería, conservación de suelos y manejo integrado de plagas (ver tabla 2).

Tabla 2. *Estrategias para superar las limitaciones de la agricultura de precisión*

Limitación identificada	Estrategia propuesta	Acción concreta
Altos costos iniciales	Modelos de acceso compartido	Crear bancos de drones, sensores, estaciones meteorológicas y servicios de análisis por asociación, cooperativa o centro rural tecnológico.
Baja conectividad rural	Infraestructura digital habilitante	Ampliar conectividad, energía rural, redes móviles y soluciones offline para zonas de baja cobertura.
Falta de formación técnica	Capacitación continua	Formar productores y extensionistas en SIG, sensores, muestreo georreferenciado, interpretación de mapas y análisis de datos.
Complejidad tecnológica	Tecnologías apropiadas	Priorizar herramientas de bajo costo, código abierto, aplicaciones móviles, imágenes satelitales gratuitas y soluciones adaptadas al contexto local.
Baja interoperabilidad	Estándares abiertos	Usar formatos compatibles, protocolos de intercambio de datos y plataformas integrables.
Desconfianza sobre los datos	Gobernanza y soberanía de datos	Definir acuerdos claros sobre propiedad, acceso, uso, protección y beneficios derivados de la información agrícola.

Limitación identificada	Estrategia propuesta	Acción concreta
Resistencia al cambio	Pilotos demostrativos	Implementar parcelas escuela, días de campo y validaciones participativas con productores.
Riesgo de enfoque tecnocéntrico	Integración agroecológica	Vincular AP con conservación de suelos, manejo eficiente del agua, bioinsumos, agroforestería y manejo integrado de plagas.

Fuente: Esta investigación

En síntesis, superar las limitaciones de la AP exige pasar de una visión centrada en dispositivos a una visión centrada en capacidades territoriales. La tecnología solo será transformadora si se adapta a las condiciones biofísicas, económicas y culturales del productor; si cuenta con infraestructura adecuada; si se acompaña de formación permanente; y si respeta la autonomía de las comunidades rurales sobre sus datos y decisiones. Bajo este enfoque, la AP puede convertirse en una herramienta estratégica para construir sistemas agrícolas más eficientes, rentables, resilientes e inclusivos, capaces de responder a los desafíos del cambio climático, la degradación del suelo y la creciente demanda de alimentos.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1. Análisis crítico de tecnologías emergentes

Objetivo: Evaluar críticamente una tecnología reciente en AP (drones, sensores de suelo, estaciones meteorológicas, software de gestión, IoT, etc.).

Instrucciones:

- Investiga una tecnología de tu elección.
- Debe presentar sus ventajas, limitaciones, requisitos técnicos, y estimación de ROI.

- Simular un escenario real en el que se recomendaría su implementación.

Discusión:

- ¿Qué barreras técnicas o socioeconómicas podrían limitar su adopción?
- ¿Cómo podría adaptarse para pequeños productores?

Ejercicio 2. Simulación de costos y retorno de inversión (ROI)

Objetivo: Calcular la viabilidad económica de implementar AP en una finca de 100 ha.

Materiales: Hoja de cálculo, precios locales de insumos y servicios, tasa de adopción tecnológica.

Instrucciones:

- Se entrega a los estudiantes un escenario con rendimientos actuales, precios de insumos, y costos de tecnología AP.
- Estimar el retorno de la inversión en 5 años.

Discusión:

- ¿En qué medida el ahorro en insumos justifica la inversión?
- ¿Qué variables alteran más el resultado económico?

Ejercicio 3. Debate: ¿Es la AP sostenible para todos los contextos?

Objetivo: Promover el análisis social, ambiental y económico del modelo.

Instrucciones:

- Formar dos grupos: uno a favor y otro en contra de la afirmación.
- Cada grupo debe preparar argumentos técnicos, sociales y éticos.

Discusión:

- ¿Cómo afecta la AP a los trabajadores rurales?
- ¿Se podría adaptar este modelo a comunidades indígenas o a agricultura familiar?

Ejercicio 4. Taller: Interpretación de mapas de NDVI

Objetivo: Comprender la utilidad del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Materiales: Imágenes satelitales, software SIG (QGIS, ArcGIS).

Instrucciones:

- Los estudiantes interpretan mapas de NDVI de un cultivo en diferentes fechas.
- Deben identificar zonas de estrés y correlacionar con datos climáticos o de suelo.

Discusión:

- ¿Qué tipos de estrés vegetal pueden detectarse?
- ¿Qué acciones agronómicas pueden derivarse de esta información?

Ejercicio 5. Redacción de protocolo para toma de decisiones basada en datos.

Objetivo: Sistematizar la toma de decisiones agrícolas con base en datos cuantitativos.

Instrucciones:

- Redactar un protocolo que incluya: recolección de datos, análisis, umbrales de decisión, intervención agronómica y monitoreo posterior.
- Aplicar a un cultivo y región específica.

Discusión:

- ¿Cuáles son los indicadores más relevantes en el proceso de decisión?
- ¿Cómo se evalúa la eficacia de la intervención?

Ejercicio 6. Análisis de normativas y aspectos legales de la AP

Objetivo: Comprender el marco legal y ético del uso de datos agrícolas.

Instrucciones:

- Investigar normativas nacionales e internacionales sobre uso de datos agrícolas, drones, y privacidad de información.
- Analizar un caso hipotético en el que un proveedor de servicios digitales hace mal uso de los datos del productor.

Discusión:

- ¿Qué derechos tiene el agricultor sobre sus datos?
- ¿Qué mecanismos de protección existen o deberían existir?

Ejercicio 7. Propuesta de implementación de AP en una finca real o simulada

Objetivo: Aplicar todos los conocimientos adquiridos en un proyecto integral.

Instrucciones:

- Se conforman equipos multidisciplinarios (agrónomos, tecnólogos, economistas rurales).
- Cada grupo diseña un plan de implementación de AP en una finca con condiciones dadas (cultivo, clima, tamaño, objetivos del productor).
- Deben incluir análisis de factibilidad técnica, económica, social y ambiental.

Discusión final:

- ¿Qué factores definieron el éxito del diseño?
- ¿Qué barreras enfrentaron y cómo las resolvieron?

Referencias

Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability, 9*(8), Article 1339. https://doi.org/10.3390/su9081339

Ballesteros-Possú, W., Valencia, J. C., & Navia-Estrada, J. F. (2022). Assessment of a cocoa-based agroforestry system in the southwest of Colombia. *Sustainability, 14*(15), Article 9447. https://doi.org/10.3390/su14159447

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture, 5*(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture, 151*, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012

Delgado, J. A., Groffman, P. M., Nearing, M. A., Goddard, T., Reicosky, D., Lal, R., Kitchen, N. R., Rice, C. W., Towery, D., & Salon, P. (2011). Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. Journal of Soil and Water Conservation, 66(4), 118A–129A. https://doi.org/10.2489/jswc.66.4.118A

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2025). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2023. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena

Escobar, S., Santander, M., Useche, P., Contreras, C., & Rodríguez, J. (2020). Aligning strategic objectives with research and development activities in a soft commodity sector: A technological plan for Colombian cocoa producers. *Agriculture, 10*(5), Article 141. https://doi.org/10.3390/agriculture10050141

Fassa, V., Pricca, N., Cabassi, G., Bechini, L., & Corti, M. (2022). Site-specific nitrogen recommendations' empirical algorithm for maize crop based on the fusion of soil and vegetation maps. *Computers and Electronics in Agriculture, 203*, Article 107479. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107479

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. https://doi.org/10.4060/cb9479en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). The state of food and agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. https://doi.org/10.4060/cc7724env

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science, 327*(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Griffin, T. W., & Lowenberg-DeBoer, J. (2005). Worldwide adoption and profitability of precision agriculture: Implications for Brazil. *Revista de Política Agrícola, 14*(4), 20–37. https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/549

Jouanjean, M.-A., Casalini, F., Wiseman, L., & Gray, E. (2020). *Issues around data governance in the digital transformation of agriculture: The farmers' perspective* (OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers No. 146). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/53ecf2ab-en

Jouanjean, M.-A., Casalini, F., Wiseman, L., & Gray, E. (2020). Issues around data governance in the digital transformation of agriculture: The farmers' perspective (OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers No. 146). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/53ecf2ab-en

Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., & Hong, S. Y. (2005). Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture, 46*(1–3), 285–308. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024, 15 de abril). Resolución número 000096 de 2024, por la cual se modifican los capítulos IV y V de la Resolución número 000407 de 2018, por la cual se reglamentan las materias técnicas del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 52.730. https://sidn.ramajudicial.gov.co/SIDN/NORMATIVA/TEXTOS_COMPLETOS/8_RESOLUCIONES/RESOLUCIONES%202024/Resoluci%C3%B3n%2096%20de%202024.pdf

Papadopoulos, G., Arduini, S., Uyar, H., Psiroukis, V., Kasimati, A., & Fountas, S. (2024). Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. *Smart Agricultural Technology, 8*, Article 100441. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441

Pérez-Ortega, D. J., Bolaños-Alomia, F. A. y Silva, A. M. (2022). Variables que influyen en la aplicación de la agricultura de precisión en Colombia: revisión de estudios. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23*(1), e2298. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2298

Pippi, L., Alibani, M., Antichi, D., Caruso, G., Finocchi, M., Fontanelli, M., Moretti, M., Nali, C., Pellegrini, E., Peruzzi, A., Ripamonti, A., Risoli, S., Silvestri, N., Tramacere, L. G., & Cotrozzi, L. (2025). Use of digital technologies into agroforestry systems: A review. *Agronomy, 15*(12), Article 2671. https://doi.org/10.3390/agronomy15122671

Sáiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy, 10*(2), Article 207. https://doi.org/10.3390/agronomy10020207

Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research, 76*(3), 267–275. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0577

Talero-Sarmiento, L., Roa-Prada, S., Caicedo-Chacon, L., & Gavanzo-Cardenas, O. (2025). A data-driven approach to improve cocoa crop establishment in Colombia: Insights and agricultural practice recommendations from an ensemble machine learning model. *AgriEngineering, 7*(1), Article 6. https://doi.org/10.3390/agriengineering7010006

Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). *Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4985en

U.S. Government Accountability Office. (2024). *Precision agriculture: Benefits and challenges for technology adoption and use* (GAO-24-105962). https://www.gao.gov/products/gao-24-105962

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special edition*. United Nations. https://doi.org/10.18356/9789210024914

United Nations Statistics Division. (2024). *Goal 2: End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture: Target 2.4*. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://unstats.un.org/sdgs/metadata/?Goal=2&Target=2.4&Text=

United Nations Statistics Division. (2024). *Goal 12: Ensure sustainable consumption and production patterns: Target 12.2*. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://unstats.un.org/sdgs/metadata/?Goal=12&Target=12.2&Text=

van Noordwijk, M. (2021). Agroforestry-based ecosystem services: Reconciling values of humans and nature in sustainable development. *Land, 10*(7), Article 699. https://doi.org/10.3390/land10070699

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming: A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Yost, M. A., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Sadler, E. J., Drummond, S. T., & Volkmann, M. R. (2017). Long-term impact of a precision agriculture system on grain crop production. Precision Agriculture, 18(5), 823–842. https://doi.org/10.1007/s11119-016-9490-5

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture, 36*(2–3), 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

Capítulo 2

Evaluación inicial del cultivo y el terreno



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. Analizar integralmente las condiciones iniciales del cultivo y del terreno como base para la planificación técnica, económica, social y ambiental de sistemas agrícolas, agroforestales y pecuarios.

2. Interpretar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reconociendo su influencia sobre la disponibilidad de agua y nutrientes, la salud del suelo y el desempeño productivo del cultivo.

3. Relacionar las variables climáticas y topográficas con la aptitud del terreno, la distribución espacial del cultivo, la gestión del agua y los riesgos asociados a erosión, anegamiento, estrés térmico o déficit hídrico.

4. Identificar y aplicar metodologías de recolección de datos básicos mediante muestreo georreferenciado, sensores, cartografía digital, estaciones meteorológicas, modelos digitales de elevación y herramientas de análisis espacial.

5. Integrar información de suelo, clima y topografía para delimitar zonas homogéneas de manejo, construir diagnósticos agroambientales y apoyar decisiones agronómicas sitio-específicas.

6. Evaluar la importancia de la evaluación inicial como fundamento para la sostenibilidad, la reducción del riesgo productivo, la eficiencia en el uso de insumos y la resiliencia territorial frente al cambio climático.

Conceptos clave

- Evaluación inicial del cultivo y del terreno: Proceso diagnóstico integral que permite caracterizar las condiciones biofísicas, productivas, sociales y económicas de un predio antes de intervenirlo o planificar su manejo.

- Diagnóstico agroambiental: Análisis sistemático de suelo, clima, topografía, cobertura, biodiversidad y condiciones de manejo para identificar limitaciones, oportunidades y riesgos del sistema productivo.

- Aptitud del terreno: Grado en que un terreno reúne las condiciones necesarias para sostener de forma adecuada un cultivo o sistema productivo determinado.

- Suelo: Recurso natural que actúa como soporte físico, químico y biológico del cultivo, regulando agua, nutrientes, aireación y actividad microbiana.

- Propiedades físicas del suelo: Conjunto de características como textura, estructura, densidad aparente, porosidad, profundidad efectiva y capacidad de retención de agua, fundamentales para el crecimiento radicular y la dinámica hídrica.

- Propiedades químicas del suelo: Variables como pH, materia orgánica, nutrientes disponibles, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica y sodicidad, que determinan la fertilidad y la disponibilidad de elementos esenciales.

- Propiedades biológicas del suelo: Indicadores relacionados con microbiota, macrofauna, respiración basal, nitrificación y actividad enzimática, que reflejan la salud ecológica y funcional del suelo.

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Propiedad química que expresa la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes nutritivos como calcio, magnesio y potasio.

- Conductividad eléctrica (CE): Indicador de sales solubles en el suelo, útil para diagnosticar salinidad y orientar medidas correctivas.

- Profundidad efectiva: Espesor útil del suelo disponible para el crecimiento radicular antes de encontrar capas limitantes físicas o químicas.

- Clima: Conjunto de condiciones atmosféricas que regulan el desarrollo del cultivo, como temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa y viento.

- Análisis agroclimático: Estudio de variables climáticas históricas y actuales para anticipar riesgos, programar labores y ajustar el manejo agronómico.

- Topografía: Configuración del relieve del terreno, expresada en pendiente, altitud, forma y exposición, con influencia directa sobre drenaje, erosión, radiación y mecanización.

- Modelo digital de elevación (DEM): Representación digital del relieve utilizada para analizar pendientes, acumulación de flujo, cuencas de contribución y zonas críticas del terreno.

- Agricultura específica por sitio: Enfoque de manejo que ajusta decisiones agronómicas a la variabilidad intra predial mediante el uso de datos espaciales y temporales.

- Zonas homogéneas de manejo: Unidades relativamente uniformes dentro del predio, definidas por semejanza en suelo, clima, topografía o comportamiento productivo, para facilitar intervenciones diferenciadas.

- Muestreo georreferenciado: Procedimiento de toma de muestras con ubicación espacial precisa, indispensable para construir mapas y analizar la variabilidad del predio.

- Sistemas de información geográfica (SIG): Herramientas digitales que permiten almacenar, superponer, analizar y visualizar información espacial relacionada con suelo, topografía, cultivos y clima.

- Interpolación geoestadística: Conjunto de métodos, como kriging o IDW, utilizados para estimar la distribución espacial de variables edáficas o climáticas a partir de puntos muestreados.

- Agricultura climáticamente inteligente: Enfoque que busca aumentar la productividad, fortalecer la resiliencia y reducir impactos ambientales mediante decisiones adaptadas a la variabilidad climática.

- Riesgo agroambiental: Probabilidad de ocurrencia de eventos o condiciones que afecten la productividad o sostenibilidad del sistema, como erosión, compactación, sequías, heladas, salinidad o degradación del suelo.

- Resiliencia del sistema productivo: Capacidad del agroecosistema para resistir, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones climáticas, biofísicas o socioeconómicas.

Desarrollo técnico

Evaluación inicial del cultivo y el terreno

El éxito de cualquier proyecto agropecuario, desde una huerta comunitaria hasta un sistema agroindustrial de exportación, depende de una evaluación inicial rigurosa del cultivo y del terreno. Este diagnóstico temprano no solo permite reconocer las características biofísicas del sitio, sino también identificar restricciones logísticas, tecnológicas y socioeconómicas, de modo que las prácticas de manejo puedan definirse con mayor precisión, productividad y sostenibilidad. En un escenario global marcado por la presión sobre los recursos y la creciente variabilidad climática, esta fase preliminar constituye un componente estratégico para fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas (Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Stafford, 2000).

La evaluación inicial del cultivo y del terreno se ha convertido en una pieza central de la agricultura moderna porque integra, en un mismo proceso, la caracterización de los recursos naturales, la valoración de las limitaciones tecnológicas y el análisis de la viabilidad económica. La articulación de estas dimensiones permite construir una visión integral de oportunidades y restricciones, facilitando decisiones sustentadas en evidencia. Para ello se combinan métodos tradicionales, como el muestreo de suelo, los recorridos de campo y las entrevistas con productores, con herramientas más avanzadas, como sensores, sistemas de información geográfica y plataformas de análisis digital, cuya integración mejora la calidad del diagnóstico y la pertinencia de las recomendaciones agronómicas (Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Trendov et al., 2019).

Desde un enfoque multidimensional, la evaluación inicial debe considerar factores bióticos y abióticos: propiedades físicas y químicas del suelo, variables climáticas como temperatura, precipitación y radiación, topografía, drenaje, cobertura vegetal y biodiversidad asociada al agroecosistema. A estos componentes se suman elementos de capital

humano, infraestructura, acceso a información y condiciones de mercado. Un análisis integral bien diseñado no solo permite identificar fortalezas, limitaciones y riesgos potenciales, sino también priorizar medidas de mitigación y estrategias de manejo adaptadas a cada contexto productivo (Stafford, 2000; Trendov et al., 2019).

1. El suelo: base de la producción agrícola

Entre todos los componentes evaluados, el suelo continúa siendo la base material de la producción vegetal. Su composición mineral, su contenido de materia orgánica y su estructura física condicionan la disponibilidad de agua y nutrientes, el crecimiento radicular y la capacidad del cultivo para tolerar eventos de estrés. Una baja capacidad de intercambio catiónico limita la retención de calcio, magnesio y potasio, mientras que un pH inadecuado puede reducir la disponibilidad de fósforo y micronutrientes esenciales como hierro y zinc. Por esta razón, la caracterización edáfica constituye una condición indispensable para cualquier diagnóstico agronómico serio (Brady & Weil, 2017).

Asimismo, la evaluación del suelo permite detectar problemas silenciosos pero determinantes, como salinidad, sodicidad, compactación o contaminación. Ignorar estas limitaciones puede comprometer la rentabilidad del sistema y acelerar su deterioro ambiental. De ahí que los análisis de textura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH y conductividad eléctrica deban complementarse con mediciones de campo, como densidad aparente o resistencia a la penetración, para construir una lectura más completa de la salud del suelo y su comportamiento espacial dentro del predio (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Brady & Weil, 2017).

La gestión responsable del recurso edáfico implica corregir limitaciones mediante prácticas como encalado, uso de abonos verdes, incorporación de materia orgánica, biorremediación o rotaciones diversificadas. Estas intervenciones no solo mejoran la fertilidad y la estructura, sino que también favorecen la actividad biológica, reducen la dependencia de fertilizantes

sintéticos y fortalecen la sostenibilidad del sistema productivo en el mediano y largo plazo (Brady & Weil, 2017; Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

2. El clima: motor y condicionante del sistema

El clima complementa al suelo como determinante central de la viabilidad agrícola. Temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación solar regulan procesos fisiológicos esenciales como fotosíntesis, respiración, transpiración, floración y llenado de órganos cosechables. En la actualidad, la creciente inestabilidad climática incrementa la incertidumbre y exige herramientas diagnósticas más robustas. En este contexto, la combinación de series históricas, estaciones meteorológicas automáticas y plataformas satelitales como NASA POWER permite construir análisis agroclimáticos útiles para planificar calendarios de siembra, anticipar eventos extremos y mejorar la capacidad de respuesta del productor (Tayyeh & Mohammed, 2023).

Cuando estos insumos se integran en modelos agroclimáticos locales y sistemas de alerta temprana, el productor puede evaluar escenarios productivos con mayor anticipación, reducir pérdidas y tomar decisiones más consistentes frente a sequías, heladas, olas de calor o variaciones en la distribución de las lluvias. Por ello, el análisis climático inicial no debe entenderse como una simple revisión del tiempo atmosférico, sino como un componente estructural de la planificación agrícola moderna (Tayyeh & Mohammed, 2023; Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

3. Topografía y planificación espacial

La topografía condiciona la distribución del agua, la erosión, la estabilidad del terreno y la incidencia diferencial de la radiación solar. Las pendientes pronunciadas favorecen la escorrentía y aumentan el riesgo de erosión y deslizamientos, mientras que las zonas deprimidas o mal drenadas suelen asociarse con encharcamiento y problemas fitosanitarios en la rizosfera. Por ello, la evaluación del relieve resulta fundamental para

planificar el uso del suelo y orientar decisiones de manejo a escala de lote y paisaje (Tarboton, 2003).

El uso de modelos digitales de elevación y herramientas de análisis del terreno permite delimitar pendientes, microcuencas, rutas preferenciales de flujo y áreas con mayor susceptibilidad a erosión o acumulación de humedad. Cuando esta información se integra con imágenes remotas y cartografía temática, se mejora la zonificación de cultivos, la ubicación de drenajes, la orientación de surcos y el diseño de prácticas de conservación como terrazas o franjas en contorno. De este modo, la topografía deja de ser un simple atributo descriptivo y se convierte en un criterio operativo para la planificación espacial del sistema agrícola (Tarboton, 2003; GFDRR, 2015).

4. Dimensión económica y social

La evaluación inicial también debe entenderse como un ejercicio de viabilidad económica y lectura social del territorio. Desde la perspectiva financiera, permite estimar requerimientos de inversión, costos operativos, disponibilidad de infraestructura y márgenes probables de rentabilidad, reduciendo el riesgo de decisiones sobredimensionadas o poco ajustadas a la realidad productiva. Desde la dimensión social, fortalece la capacidad de decisión cuando incorpora el conocimiento local, la experiencia del productor y las condiciones organizativas de la comunidad (Trendov et al., 2019).

Además, una evaluación inicial bien construida puede orientar procesos de capacitación, organización del trabajo y articulación de pequeños productores en cadenas de valor más eficientes. Esto favorece no solo la competitividad del predio, sino también la cohesión social, la apropiación tecnológica y la sostenibilidad económica del entorno rural. En consecuencia, la evaluación inicial no debe reducirse a una práctica técnica aislada, sino asumirse como una base para la planificación territorial y productiva con enfoque inclusivo (Trendov et al., 2019; Rijswijk et al., 2021).

5. Sostenibilidad y salvaguarda ambiental

En un contexto de degradación acelerada de tierras, la evaluación inicial se vuelve indispensable para promover sistemas de producción más regenerativos y menos extractivos. La evidencia reciente muestra que la degradación del suelo y del territorio continúa expandiéndose a gran escala, comprometiendo productividad, seguridad alimentaria, biodiversidad y estabilidad climática. Frente a este panorama, el diagnóstico temprano permite orientar prácticas como rotaciones diversificadas, coberturas vegetales, manejo conservacionista del agua e integración de árboles en arreglos agroforestales, de modo que el sistema productivo responda mejor a los desafíos ambientales actuales (UNCCD, 2025).

En síntesis, la evaluación inicial del cultivo y del terreno constituye el fundamento técnico sobre el cual se construyen decisiones agronómicas más eficientes, resilientes y sostenibles. Diagnosticar bien al inicio no solo mejora la probabilidad de éxito productivo, sino que reduce riesgos, orienta inversiones y fortalece la capacidad adaptativa del sistema frente a un entorno biofísico y económico cada vez más cambiante (Sáiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Stafford, 2000; UNCCD, 2025).

6. Recolección de datos básicos: suelo, clima y topografía

La recolección de datos básicos constituye la puerta de entrada a la evaluación inicial del predio. Se organiza mediante campañas de muestreo georreferenciado, monitoreo climático continuo y levantamientos topográficos de detalle, de modo que cada variable del suelo, patrón pluviométrico o gradiente de pendiente pueda medirse con protocolos consistentes y comparables. En la práctica, esta fase define la calidad del diagnóstico posterior, porque de ella depende la capacidad de interpretar la variabilidad del terreno y convertirla en decisiones agronómicas útiles. Antes de profundizar en estos procedimientos, resulta pertinente introducir el concepto de agricultura específica por sitio, que representa la evolución operativa de este enfoque diagnóstico.

6.1 Agricultura específica por sitio

La agricultura específica por sitio engloba un conjunto de técnicas orientadas a capturar la variabilidad intra parcelaria, transformar datos en conocimiento y traducir ese conocimiento en decisiones de manejo diferenciado. Bajo este enfoque, el objetivo no es aplicar insumos de forma uniforme, sino ajustar el manejo a la variación real del campo, de manera que agua, fertilizantes, semillas y otras prácticas se apliquen cuando, donde y en la cantidad necesaria para optimizar la productividad y reducir impactos ambientales.

Para lograrlo, la agricultura específica por sitio combina fuentes de información relativamente estables o predictibles, como topografía, conductividad eléctrica del suelo, imágenes de cultivo, mapas de rendimiento y propiedades químicas, que luego se integran para delimitar zonas de manejo. Diversos estudios muestran que estas zonas permiten caracterizar la heterogeneidad del suelo y del potencial productivo, mejorar el diseño del muestreo y apoyar estrategias de fertilización o manejo diferencial con mayor eficiencia técnica.

La agricultura específica por sitio también se expresa en decisiones como la elección del cultivo, la variedad y la densidad de siembra según cada microambiente. En suelos más profundos o fértiles puede justificarse el uso de materiales de mayor potencial, mientras que en laderas o ambientes con mayores restricciones conviene optar por variedades más rústicas o estrategias de menor demanda de insumos. Esta lógica reduce el sesgo del “promedio” y favorece un equilibrio más realista entre productividad, riesgo y sostenibilidad del sistema.

En la gestión hídrica, la integración de sensores de humedad, estaciones climáticas y estrategias de riego de ahorro de agua permite ajustar la aplicación a la demanda real del cultivo. En arroz, por ejemplo, la evidencia reciente sobre riego con humedecimiento y secado alternado muestra reducciones del uso de agua cercanas al 30 % a escala global,

con penalizaciones mínimas de rendimiento o, en ciertos contextos, sin comprometer la cosecha. Esto implica menores costos de bombeo y un menor riesgo de pérdidas de nutrientes por lixiviación.

Finalmente, la agricultura específica por sitio fortalece la trazabilidad y la diferenciación productiva, ya que la georreferenciación de lotes y el registro de prácticas de manejo facilitan procesos de monitoreo y verificación de sostenibilidad. Sin embargo, la evidencia reciente también advierte que estos sistemas solo generan valor cuando están acompañados de cooperación en la cadena, capacidad local y mecanismos que justifiquen los costos de implementación para el productor. Por ello, la evaluación inicial y la agricultura específica por sitio forman un binomio inseparable que convierte la variabilidad del paisaje en una herramienta de gestión, más que en una limitación.

Evaluación del suelo

La recolección rigurosa de datos de suelo constituye el eje sobre el cual se apoya cualquier sistema agrícola de alto desempeño. Más que describir la edafología local, este proceso construye la base científica que orientará decisiones sobre fertilidad, riego, manejo de zonas y conservación. Una evaluación integral debe articular variables físicas, químicas y espaciales con herramientas de diagnóstico como sensores, sistemas de posicionamiento global, cartografía digital y modelos de análisis, con el fin de obtener una representación confiable y dinámica del recurso suelo. Esa integración mejora la interpretación de la variabilidad, optimiza el uso de insumos y fortalece la resiliencia del sistema frente a escenarios de cambio climático y degradación del terreno.

A continuación, se presenta un protocolo secuencial recomendado para la evaluación integral del suelo.

El propósito central de la recolección de datos del suelo es construir un diagnóstico integral que permita: i) evaluar la aptitud del terreno para

cultivos o materiales específicos, ii) identificar limitantes físicas, químicas o de manejo que puedan comprometer la productividad en el corto y largo plazo, y iii) diseñar planes de manejo adaptativo más eficientes y menos impactantes. Esta línea base también resulta indispensable para delimitar zonas de manejo, monitorear cambios a lo largo del tiempo y respaldar estrategias de AP, agricultura regenerativa y manejo específico por sitio.

7.2 Selección y delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio debe iniciarse con un análisis multiescalar que combine observación de campo, cartografía temática y herramientas geoespaciales. (ver Figura 1 y Tabla 1).

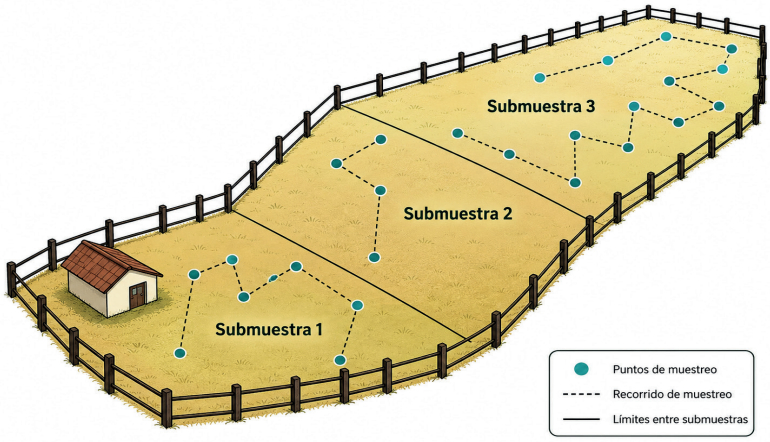
Tabla 1. *Flujo de trabajo recomendado*

Etapa	Descripción técnica	Herramientas/ insumos principales	Resultado esperado
Identificación geográfica	Uso de sistemas de información geográfica para superponer capas de relieve, uso de la tierra, materiales parentales, drenaje y otras covariables ambientales, con el fin de delimitar polígonos relativamente homogéneos según sus características geo ambientales. La cartografía digital del suelo y el modelo SCORPAN permiten mejorar la predicción de propiedades del suelo y su representación espacial.	SIG, cartografía temática, capas de relieve, uso del suelo, drenaje, modelo SCORPAN	Delimitación preliminar de unidades homogéneas del terreno

Etapa	Descripción técnica	Herramientas/ insumos principales	Resultado esperado
Reconocimiento preliminar	Recorridos de campo con GPS y apoyo de imágenes aéreas o sensores remotos para verificar pendiente, cobertura vegetal, señales de erosión, compactación superficial y patrones visibles de variabilidad. La integración de capas espaciales, experiencia de campo, mapas de rendimiento e imágenes permite interpretar mejor la heterogeneidad y definir si conviene un muestreo por cuadrícula o por zonas de manejo.	GPS, imágenes aéreas, sensores remotos, mapas de rendimiento, observación de campo	Verificación en terreno de la variabilidad y definición del enfoque de muestreo
Diseño de muestreo	Selección de puntos representativos mediante criterios estratificados que incluyan lomos, depresiones, terrazas y otras posiciones del paisaje.	Criterios estratificados, zonificación, capas de información, puntos georreferenciados	Definición de puntos y densidad de muestreo ajustados a la heterogeneidad del terreno
Diseño de muestreo	Para mapas detallados de fertilidad se recomiendan densidades cercanas a una muestra por acre; en ambientes menos variables pueden aceptarse densidades menores. Cuando se trabaja por zonas de manejo, se recomienda integrar múltiples capas de información y evitar una subdivisión excesiva que dificulte la operatividad.		

Fuente: Esta Investigación

Figura 1. *Selección y delimitación del área de estudio*



Fuente: Modificado de AKRA, (2002)

7.3 Datos físicos del suelo

Las propiedades físicas definen la arquitectura del perfil y regulan el flujo de agua, aire y calor (tabla 2).

Tabla 2. *parámetros esenciales*

Parámetro físico del suelo	Descripción	Método o herramienta de evaluación	Importancia agronómica
Textura	Proporciones de arena, limo y arcilla del suelo	Hidrómetro o granulometría láser	Regula la velocidad de infiltración, la retención de agua y la disponibilidad hídrica para el cultivo
Estructura	Estado de agregación del suelo, presencia de horizontes compactados y costras superficiales	Análisis visual y pruebas de estabilidad de agregados	Determina la aireación, la infiltración, el crecimiento radicular y la susceptibilidad a la degradación física

Parámetro físico del suelo	Descripción	Método o herramienta de evaluación	Importancia agronómica
Densidad aparente	Relación entre la masa seca del suelo y su volumen total	Cilindros inoxidables de volumen conocido	Permite identificar compactación; valores superiores a 1,5 g cm^{-3} pueden restringir el desarrollo radicular y la aireación
Porosidad total	Proporción del volumen del suelo ocupada por poros	Derivada de la densidad aparente y la densidad real	Indica la capacidad del suelo para almacenar aire y agua, influyendo en la actividad radicular y microbiana
Profundidad efectiva	Espesor útil del perfil para el crecimiento de raíces	Barrena y penetrómetro	Permite identificar capas endurecidas como fragipanes o petroplintos que limitan la exploración radicular
Capacidad de retención de agua	Cantidad de agua que el suelo puede almacenar y poner a disposición de la planta	Curvas de retención de humedad (-33 kPa a -1500 kPa), bandejas de presión o tensiómetros in situ	Permite estimar el agua disponible para el cultivo y orientar el manejo del riego

Fuente: Esta investigación.

Estos indicadores permiten clasificar la aptitud física del suelo y seleccionar prácticas como subsolado, labranza reducida o incorporación de materia orgánica para mejorar la estructura.

7.4 Datos químicos del suelo

Desde la dimensión química, con estos datos se elaboran mapas de fertilidad sectorizada, permitiendo dosificaciones variables de fertilizantes y ajustes de pH mediante cales o yeso agrícola (ver tabla 3).

Tabla 3. *Estudio de la fertilidad*

Parámetro químico	Método de evaluación	Importancia agronómica
pH	Potenciómetro en relación suelo:agua 1:2,5	Define acidez o alcalinidad e influye en la disponibilidad de nutrientes.
Materia orgánica (MO)	Walkley-Black, combustión seca o NIRS	Mejora la CIC, la fertilidad, la retención de agua y la actividad biológica.
Nitrógeno total	Kjeldahl o Dumas	Estima la reserva de nitrógeno y orienta la fertilización.
Fósforo disponible	Bray II u Olsen, según el pH	Favorece desarrollo radicular, floración y formación reproductiva.
Potasio intercambiable	Acetato de amonio	Regula apertura estomática, balance hídrico y calidad del producto.
Calcio y magnesio	EDTA	Contribuyen a la estructura del suelo, nutrición vegetal y equilibrio de bases.
Azufre	Turbidimetría de sulfato	Participa en síntesis de aminoácidos, proteínas y enzimas.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Análisis del complejo de intercambio	Indica la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes.
Conductividad eléctrica (CE)	Conductímetro	Diagnostica salinidad; valores altos pueden limitar el crecimiento del cultivo.
Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)	Cálculo con cationes intercambiables	Diagnostica sodicidad y orienta enmiendas con calcio y lavado de sales.

Fuente: Esta investigación.

7.5 Datos biológicos del suelo (ver tabla 4)

Tabla 4. *Indicadores biológicos para determinar la salud del suelo*

Parámetro biológico del suelo	Descripción	Método o herramienta de evaluación	Importancia agronómica
Microbiota del suelo	Cuantificación de bacterias, hongos y actinomicetos presentes en el suelo	Recuento en placas o secuenciación 16S/ITS	Permite evaluar la diversidad microbiana y su relación con la resiliencia funcional del suelo; los índices de Shannon y Simpson ayudan a interpretar estabilidad ecológica
Macrofauna y mesofauna del suelo	Evaluación de organismos como lombrices, coleópteros y ácaros	Monolitos de suelo y recuento de individuos	Refleja la actividad bioturbadora y la calidad biológica del suelo; abundancias superiores a 150 ind m^{-2} sugieren buena actividad edáfica
Respiración basal	Medición del flujo de CO_2 liberado por la actividad biológica del suelo	Cámaras estáticas o métodos de incubación	Indica el nivel de actividad microbiana y la intensidad de la mineralización; valores altos pueden reflejar alta actividad biológica, pero también riesgo de pérdida de carbono
Nitrificación potencial	Capacidad del suelo para transformar amonio en nitrato por acción microbiana	Ensayos de laboratorio específicos	Permite evaluar la dinámica del nitrógeno y la capacidad del suelo para sostener procesos de transformación nutrimental
Actividad enzimática	Evaluación de enzimas relacionadas con los ciclos biogeoquímicos del suelo	Ensayos de ureasa, fosfatasa y β-glucosidasa	Informa sobre la actividad metabólica del suelo y su capacidad para sostener los ciclos de nitrógeno, fósforo y carbono

Fuente: Esta investigación.

Integrar estos parámetros revela la capacidad del suelo para sostener procesos ecológicos clave (ciclos de nutrientes, formación de agregados, supresión de patógenos).

7.6 Herramientas y técnicas para la recolección de datos

La digitalización ha potenciado la captura y el procesamiento de información edáfica, (ver tabla 5).

Tabla 5. *Herramientas y técnicas para la recolección de datos*

Categoría	Herramientas o técnicas	Descripción	Aplicación principal
Herramientas de campo	Barrenas holandesas	Instrumentos manuales para extraer muestras de suelo a diferentes profundidades	Muestreo y descripción del perfil del suelo
Herramientas de campo	Cilindros de Uhland	Dispositivos para tomar muestras inalteradas de suelo	Determinación de densidad aparente y propiedades físicas
Herramientas de campo	Tensiómetros analógicos y digitales	Equipos para medir la tensión o potencial del agua en el suelo	Monitoreo de humedad y apoyo a la programación del riego
Herramientas de campo	Penetrologgers Bluetooth	Dispositivos electrónicos que registran la resistencia mecánica del suelo	Evaluación de compactación y profundidad efectiva
Herramientas de campo	Espectrómetros portátiles NIR	Equipos de espectroscopía de infrarrojo cercano para análisis rápidos en campo	Estimación rápida de propiedades edáficas
Herramientas de campo	GPS submétricos	Equipos de georreferenciación de alta precisión	Ubicación exacta de puntos de muestreo y cartografía de suelos

Categoría	Herramientas o técnicas	Descripción	Aplicación principal
Metodologías de laboratorio	ISO 25177	Protocolo estandarizado para análisis textural	Determinación de arena, limo y arcilla
Metodologías de laboratorio	EPA 3051A	Método de digestión para análisis químico de muestras	Cuantificación de metales pesados en suelo
Metodologías de laboratorio	ISO 15685	Protocolo para evaluación de respiración del suelo	Medición de actividad biológica y mineralización
Técnicas digitales	Drones RGB	Plataformas aéreas con cámaras convencionales	Captura de imágenes para monitoreo visual y cartografía
Técnicas digitales	Drones multiespectrales	Plataformas con sensores espectrales especializados	Evaluación de vigor, estrés y variabilidad del cultivo
Técnicas digitales	LiDAR	Tecnología de escaneo láser de alta resolución	Modelación topográfica y análisis detallado del relieve
Técnicas digitales	Sensores proximales (Veris 3100, EM38)	Equipos que miden propiedades del suelo en contacto o proximidad	Evaluación de conductividad eléctrica y variabilidad edáfica
Técnicas digitales	Plataformas SIG (QGIS, ArcGIS)	Sistemas para almacenar, analizar y representar información espacial	Elaboración de mapas temáticos y zonificación del terreno
Técnicas digitales	Aplicaciones móviles (OneSoil, FieldClimate, Agmatix)	Plataformas digitales para visualización y análisis de datos agrícolas	Generación y actualización de mapas de variabilidad en tiempo casi real

Fuente: Esta investigación.

Ejemplo visual de una herramientas y técnicas para la recolección de datos (ver figura 2)

Figura 2. *Monitoreo del índice NDVI en caña de azúcar mediante la aplicación OneSoil*



Fuente: Esta investigación.

7.7 Análisis de datos y elaboración de mapas

El procesamiento de la información exige una combinación de estadística robusta y geoanálisis avanzado. Entornos como R y Python, mediante paquetes y librerías especializadas, permiten depurar bases de datos, realizar estadística descriptiva, explorar correlaciones, ejecutar interpolaciones geoestadísticas como kriging e IDW y generar mapas temáticos de textura, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica o densidad aparente. En particular, herramientas como gstat y soiltexture han fortalecido la reproducibilidad y la trazabilidad de los análisis espaciales aplicados al suelo, facilitando la representación cartográfica de propiedades edáficas con mayor consistencia técnica (Pebesma, 2004; Moeys et al., 2024).

Una vez depurados, modelados y espacializados los datos, se formulan planes de manejo específico por sitio que pueden incluir corrección de acidez mediante cales o yeso, fertilización variable según el comportamiento espacial de N, P y K, uso dirigido de bioinsumos, descompactación localizada

y rotaciones con leguminosas de cobertura para mejorar el contenido de materia orgánica. Más que recetas uniformes, estos planes deben apoyarse en la heterogeneidad real del terreno y acompañarse de un esquema de seguimiento periódico, con indicadores verificables como incremento del carbono o la materia orgánica, reducción de la compactación, mejora de la infiltración y aumento del rendimiento de referencia. De este modo, el análisis espacial deja de ser un ejercicio descriptivo y se convierte en una herramienta operativa para la toma de decisiones agronómicas más precisas y sostenibles (Bönecke et al., 2021; Vullaganti et al., 2025).

En conjunto, la recolección y el análisis ampliado de datos no solo profundizan el diagnóstico respecto a los enfoques convencionales, sino que mejoran la capacidad de interpretar la variabilidad del sistema cuando se integran variables físicas, químicas, biológicas y digitales. Este enfoque integral fortalece la calidad del manejo, reduce incertidumbre y aporta beneficios simultáneos para el productor, el ambiente y la sociedad, al respaldar sistemas agrícolas más eficientes, resilientes y compatibles con las exigencias contemporáneas de seguridad alimentaria y adaptación climática (Chlingaryan et al., 2018; Vullaganti et al., 2025).

8. Análisis climático

Paralelamente a los factores edáficos y topográficos, el clima tiene una importancia decisiva en la agricultura, porque condiciona el rango de cultivos viables, la duración de sus ciclos y las prácticas de manejo requeridas para maximizar el rendimiento. Variables como temperatura media, amplitud térmica, distribución e intensidad de la precipitación y radiación fotosintéticamente activa inciden de forma directa sobre procesos fisiológicos como fotosíntesis, respiración, transpiración y acumulación de biomasa. Por ello, comprender el comportamiento climático local no es un complemento del diagnóstico, sino uno de sus ejes estructurales (Hatfield et al., 2011; Moore et al., 2021).

En un escenario de cambio climático caracterizado por una mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos, alteraciones en los regímenes de lluvia y aumento de la variabilidad térmica, el análisis climático adquiere una relevancia estratégica. La integración de series históricas, pronósticos estacionales y modelos predictivos de alta resolución permite anticipar olas de calor, sequías, heladas tempranas o lluvias concentradas, y ajustar las decisiones de manejo antes de que el riesgo se materialice. Esta capacidad de anticipación no solo reduce pérdidas económicas, sino que también fortalece la resiliencia del sistema productivo y la estabilidad de la producción regional (IPCC, 2023).

En consecuencia, la recolección y el análisis de datos climáticos se han convertido en herramientas esenciales de planificación y gestión de cultivos. Un diagnóstico climático sólido permite optimizar calendarios de siembra, orientar la selección varietal, ajustar el manejo hídrico y definir medidas preventivas frente a eventos adversos. En términos operativos, esto consolida esquemas de agricultura climáticamente inteligente y mejora la capacidad del sistema para responder a un entorno ambiental cada vez más incierto (Hatfield et al., 2011; IPCC, 2023).

8.1 Importancia de los datos climáticos en la agricultura

Los factores climáticos clave temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar y viento influyen en todas las etapas del desarrollo vegetal, desde la germinación hasta la madurez fisiológica. Cada especie, e incluso cada cultivar, presenta rangos óptimos y umbrales críticos frente a estas variables. La temperatura regula la velocidad de las reacciones bioquímicas, la actividad enzimática y el balance entre fotosíntesis y respiración; cuando el calor excede ciertos rangos fisiológicos, la eficiencia fotosintética disminuye y el rendimiento puede verse comprometido, especialmente bajo estrés combinado con déficit hídrico (Moore et al., 2021).

De manera similar, la cantidad, distribución y estacionalidad de la precipitación determinan el balance hídrico del cultivo. Una oferta irregular

de lluvias puede provocar tanto anegamiento y reducción de oxígeno en la rizosfera como déficit hídrico, cierre estomático y disminución de la asimilación de CO_2. Por ello, más que el volumen total de lluvia, resulta determinante su distribución temporal y su interacción con las demandas evaporativas del ambiente (Hatfield et al., 2011; IPCC, 2023).

La radiación solar, como fuente primaria de energía para la fotosíntesis, condiciona la producción de fotoasimilados y, por tanto, el rendimiento potencial del cultivo. A su vez, el viento puede favorecer procesos como intercambio de masa, dispersión de polen o ventilación del dosel, pero también incrementar la evapotranspiración, deshidratar tejidos y ocasionar daño mecánico en tallos, hojas o frutos cuando su intensidad supera ciertos límites. En este sentido, el análisis climático debe contemplar la interacción entre variables y no tratarlas de forma aislada, pues sus efectos se acumulan y se expresan sobre la productividad final del sistema (Gardiner et al., 2016; Moore et al., 2021).

8.2 Fuentes y métodos de recolección de datos

Para capturar estas variables se emplean métodos que van desde los tradicionales hasta los de vanguardia (ver tabla 6).

Tabla 6. *Métodos de recolección de datos climáticos*

Fuente o método de recolección	Variables registradas	Características técnicas	Aplicación agronómica
Estaciones meteorológicas manuales y automáticas	Temperatura, humedad relativa, precipitación, presión barométrica y velocidad del viento	Realizan registros con frecuencias de diez minutos a una hora; las automáticas pueden conectarse a sistemas SCADA o plataformas web para enviar datos casi en tiempo real	Permiten el monitoreo climático continuo y apoyan la toma de decisiones sobre siembra, riego, fertirrigación y manejo del cultivo

Fuente o método de recolección	Variables registradas	Características técnicas	Aplicación agronómica
Sensores de campo	Temperatura del suelo, humedad del suelo y balance hídrico local	Incluyen termómetros de suelo, sondas capacitivas de humedad y lisímetros portátiles; generan datos microclimáticos específicos a nivel de parcela	Facilitan el ajuste fino del riego y la fertirrigación según las condiciones reales del cultivo y del suelo
Satélites de observación terrestre (NOAA, Sentinel-2, Landsat 8)	Índices espectrales como NDVI, EVI y LST, además de variables de cobertura y temperatura superficial	Proveen imágenes multiespectrales para el monitoreo de grandes extensiones con cobertura periódica y análisis espacial amplio	Permiten detectar estrés hídrico o térmico, evaluar vigor vegetal y monitorear la variabilidad espacial del cultivo
Drones multiespectrales y térmicos	Vigor del cultivo, temperatura de dosel, déficit hídrico y focos iniciales de plagas	Ofrecen resoluciones de aproximadamente 3–5 cm por píxel, adecuadas para análisis detallado en predios complejos o de difícil acceso	Ayudan a identificar hotspots de estrés, heterogeneidad de vigor y áreas problemáticas para manejo localizado

Fuente: Esta investigación.

El abanico tecnológico se completa con bases de datos históricas nacionales e internacionales que almacenan décadas de registros diarios. Estos insumos permiten calcular índices agroclimáticos (GDD, CHU, Kc mensuales) y construir calendarios térmicohídricos ajustados a cada cultivo.

8.3 Aplicaciones prácticas del análisis climático

En la era del **Internet de las Cosas (IoT)** y la **inteligencia artificial**, los datos climáticos fluyen desde sensores a la nube, donde algoritmos de machine learning generan alertas tempranas y recomendaciones automáticas. Este ecosistema digital empodera al agricultor con información de alta frecuencia, favorece respuestas rápidas y convierte la variabilidad

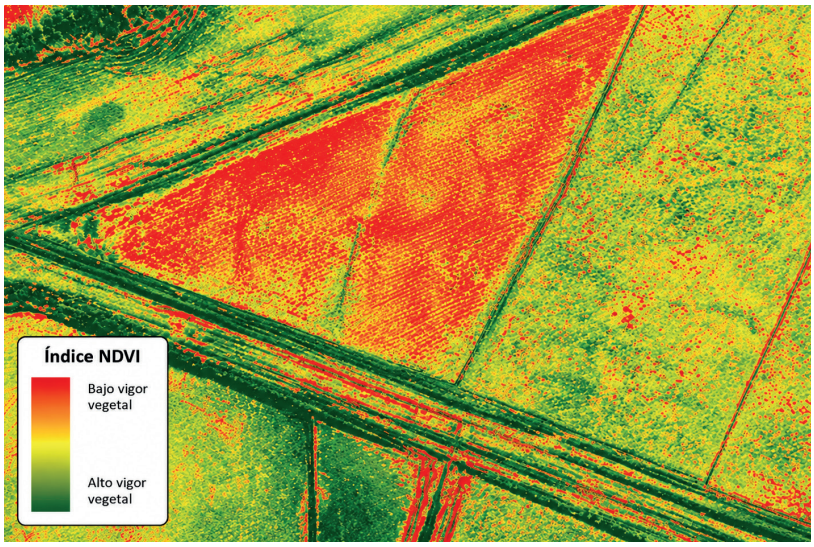
climática en una variable administrable, más que en un riesgo incontrolable (Ver tabla 7 y figura 3).

Tabla 7. *Aplicaciones prácticas del análisis climático*

Aplicación práctica	Descripción	Utilidad agronómica
Selección de cultivos y variedades	Cruce de las exigencias climáticas de cada especie o cultivar con el perfil agroclimático regional	Permite elegir materiales genéticos más adaptados a las condiciones locales y reducir el riesgo de fracaso productivo
Ajuste de fechas de siembra y cosecha	Uso de modelos fenológicos vinculados a temperaturas umbral y pronósticos estacionales	Facilita sincronizar las etapas críticas del cultivo con condiciones ambientales favorables
Gestión eficiente del riego	Integración de datos de precipitación efectiva, evaporación y humedad del suelo	Permite diseñar planes de riego que eviten déficit hídrico y percolación profunda, optimizando agua y energía
Manejo fitosanitario preventivo	Identificación de ventanas climáticas favorables para patógenos y plagas	Ayuda a programar aplicaciones oportunas y selectivas, reduciendo agroquímicos y costos de control
Mitigación de eventos extremos	Uso de información climática para evaluar recurrencia y severidad de fenómenos adversos	Justifica medidas como mallas antigranizo, sistemas antihelada o cultivos de cobertura para reducir daños

Fuente: Esta investigación.

Figura 3. *Imagen de Dron aplicando NDVI de su cámara multiespectral*



Fuente: Esta investigación.

Los registros climáticos históricos, resguardados en bases de datos nacionales e internacionales, constituyen una fuente estratégica de información para la agricultura contemporánea. Su análisis sistemático permite identificar patrones y tendencias de largo plazo, como secuencias de años secos, inviernos más rigurosos, cambios en la distribución de las lluvias o variaciones en la radiación, lo que facilita la construcción de escenarios útiles para anticipar sequías, heladas o tormentas intensas. A partir de este conocimiento, los agricultores pueden adoptar medidas preventivas, como ajustar calendarios de siembra, reforzar la infraestructura de riego o planificar coberturas temporales que disminuyan las pérdidas potenciales (FAO, 2019; Born et al., 2021; WMO, 2015).

Una vez recopilados, los datos climáticos deben someterse a procesos de depuración, control de calidad y análisis estadístico, ya que solo así los registros brutos se convierten en conocimiento útil para la toma de decisiones. Esta etapa orienta la selección de cultivos y variedades,

la calendarización de labores y el diseño de estrategias de manejo más ajustadas al entorno. En términos prácticos, un diagnóstico climático robusto permite elegir materiales genéticos más adaptados a zonas frías, cálidas o secas, y utilizar modelos fenológicos vinculados a temperaturas umbral y series históricas para ubicar con mayor precisión las ventanas óptimas de siembra y cosecha, sincronizando las fases críticas del cultivo con condiciones ambientales más favorables (Born et al., 2021; FAO, 2019).

El manejo del riego es otro de los ámbitos que más se beneficia del análisis climático. Cuando se integran datos de precipitación efectiva, evapotranspiración y humedad del suelo, es posible diseñar calendarios de riego que eviten tanto el déficit hídrico como la percolación profunda, mejorando la eficiencia en el uso del agua y reduciendo pérdidas de nutrientes. La metodología FAO-56 ha sido una referencia central para este tipo de programación, precisamente porque permite relacionar demanda atmosférica, desarrollo del cultivo y balance hídrico del suelo en decisiones operativas de riego más precisas (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2015).

El componente fitosanitario también depende de manera crítica de la información climática. La temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la duración del mojado foliar condicionan el desarrollo de numerosas plagas y enfermedades. En patógenos como Phytophthora infestans, por ejemplo, el riesgo epidémico se incrementa con condiciones húmedas y temperaturas moderadas, razón por la cual diversos modelos de pronóstico utilizan precisamente estas variables para definir alertas y orientar el momento de intervención. Cuando estos sistemas funcionan adecuadamente, permiten programar aplicaciones más oportunas y selectivas, evitando tratamientos innecesarios y reduciendo costos y presión ambiental por agroquímicos (UC IPM, 2014).

La gestión del riesgo climático es, quizá, una de las ventajas más tangibles de disponer de información meteorológica confiable y oportuna. Sequías extremas, tormentas de granizo, lluvias torrenciales o heladas tardías han generado históricamente pérdidas severas en la producción

agrícola, pero la disponibilidad de pronósticos y servicios climáticos permite reprogramar siembras, introducir coberturas, activar medidas de protección o ajustar el manejo antes de que el evento se materialice. De este modo, la información climática no solo mejora la eficiencia productiva, sino que fortalece la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a una variabilidad cada vez mayor (FAO, 2019; WMO, 2015).

La revolución digital ha multiplicado, además, la variedad de fuentes y la velocidad con la que se capturan, procesan e interpretan los datos agroclimáticos. Sensores conectados mediante Internet de las Cosas permiten registrar variables como temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío o humedad del suelo en tiempo casi real; los satélites de observación terrestre generan imágenes multiespectrales con alta frecuencia de revisita; y las plataformas de analítica avanzada integran estos flujos de información con modelos numéricos y algoritmos de inteligencia artificial para producir diagnósticos, mapas de riesgo y alertas operativas cada vez más localizadas. Esta convergencia tecnológica ha ampliado sustancialmente la capacidad de respuesta del productor y del sistema de apoyo a la decisión (FAO, 2019).

La incorporación de estas tecnologías no solo mejora la eficiencia, sino que también refuerza la sostenibilidad del sistema. Anticipar olas de calor permite ajustar el riego y proteger fases fenológicas sensibles; prever periodos húmedos ayuda a racionalizar aplicaciones fitosanitarias; y detectar temporadas secas prolongadas puede justificar el uso de coberturas o estrategias de conservación de humedad. En consecuencia, el análisis climático deja de ser un ejercicio meramente descriptivo y se convierte en una herramienta para optimizar recursos, reducir impactos y fortalecer la adaptación frente a la volatilidad del clima (FAO, 2019; IPCC, 2023).

En síntesis, la integración inteligente de datos climáticos en la gestión agrícola moderna permite tomar decisiones más acertadas sobre qué cultivar, cuándo hacerlo y bajo qué condiciones de manejo. Sensores de campo, satélites, plataformas digitales y sistemas de análisis convergen hoy

para ofrecer una lectura climática más detallada del territorio. Cuando esa información se transforma en acción, se traduce en mayor productividad, menores pérdidas operativas y una agricultura más resiliente y sostenible frente a los desafíos crecientes del cambio climático global (Born et al., 2021; WMO, 2015; FAO, 2019).

9. Análisis de la topografía

La topografía y la planificación espacial son componentes decisivos para comprender cómo la gravedad, la radiación y el flujo del agua modelan el rendimiento agrícola. La configuración del relieve condiciona procesos como infiltración, escorrentía, erosión y distribución diferencial de la energía solar, todos ellos con efectos directos sobre la sanidad y la productividad de los cultivos. Las pendientes pronunciadas favorecen la pérdida de suelo fértil y elevan el riesgo de deslizamientos, mientras que las depresiones y vaguadas tienden a concentrar humedad, propiciando anegamientos, compactación y, en determinados contextos, acumulación de sales. Cuando no se incorpora al manejo agronómico, una topografía adversa puede reducir la eficiencia del riego, alterar la dinámica de nutrientes y limitar las labores mecanizadas, incrementando los costos de producción. (Burrough & McDonnell, 1998; Tarboton, 2003; Fu & Rich, 2000).

El uso de tecnologías avanzadas, como drones equipados con cámaras RGB y multiespectrales, sensores LiDAR aerotransportados y sistemas de información geográfica de alta resolución, ha fortalecido notablemente la planificación espacial. Estas herramientas permiten generar cartografía detallada del terreno, delimitar zonas agroecológicas diferenciadas, ubicar cultivos según sus requerimientos hídricos y lumínicos, y diseñar prácticas de conservación como terrazas, franjas de contorno o zanjas de infiltración. En consecuencia, una evaluación topográfica precisa no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce el impacto negativo sobre el ecosistema local al disminuir la erosión y favorecer un uso más racional del paisaje. (Burrough & McDonnell, 1998; Farhan et al., 2024).

En la práctica, la topografía influye sobre la distribución del agua de riego, la aireación radicular, la orientación de las filas y, por extensión, sobre la fotosíntesis y la temperatura del dosel. Por ello, conocer con precisión la pendiente, la altitud, la forma de las laderas y las direcciones de drenaje resulta indispensable para tomar decisiones que optimicen la productividad y aseguren la sostenibilidad del sistema en el mediano y largo plazo. La orientación del terreno y el sombreado topográfico, por ejemplo, modifican la distribución de la radiación incidente, con efectos sobre el balance energético, la evapotranspiración y el microclima del cultivo. (Fu & Rich, 2000; Xian et al., 2024).

Tradicionalmente, el levantamiento topográfico se apoyaba en niveles ópticos, teodolitos y cintas métricas para construir curvas de nivel y perfiles del terreno. Aunque estos métodos siguen siendo útiles, resultan laboriosos y con frecuencia insuficientes en predios extensos o de difícil acceso. En las últimas décadas, la incorporación de receptores GPS/GNSS de alta precisión, fotogrametría digital y plataformas SIG ha transformado la captura y el análisis del relieve. El GPS diferencial y la fotogrametría con drones permiten generar modelos digitales de elevación de muy alta resolución, que pueden integrarse con capas de suelo, clima y cobertura para construir una lectura agroambiental mucho más completa. (Tarboton, 2003; Martínez-Carricondo et al., 2023).

La sinergia entre GPS/GNSS, drones y SIG aporta información detallada sobre altitud, pendiente media, exposición solar y microrelieves, todos ellos parámetros valiosos para definir zonas de manejo, elegir variedades más adaptadas al estrés térmico o hídrico y detectar irregularidades del terreno que podrían pasar inadvertidas en estudios convencionales. En particular, los drones permiten identificar pequeñas depresiones, cárcavas incipientes, cambios sutiles de pendiente y problemas de drenaje superficial con un nivel de detalle especialmente útil para AP (Bilodeau et al., 2025; Wang et al., 2024).

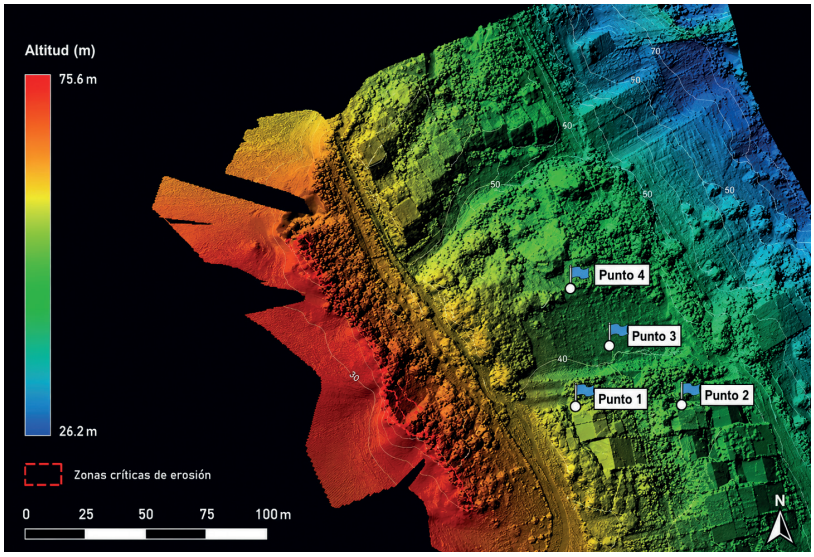
Una vez recolectados, los datos topográficos deben procesarse y modelarse para generar productos cartográficos operativos. Los modelos

digitales de elevación permiten derivar mapas de pendiente, curvatura, acumulación de flujo y orientación, esenciales para identificar áreas críticas de erosión, estancamiento hídrico o concentración de escorrentía. Sobre esta base pueden diseñarse drenajes, caminos agrícolas, obras de contención y plataformas de cargue que respeten el relieve natural y reduzcan el riesgo de degradación. De igual forma, el cálculo de radiación potencial y exposición facilita la ubicación más adecuada de cultivos sensibles al exceso de insolación o, por el contrario, demandantes de mayor exposición lumínica. (Tarboton, 2003; Fu & Rich, 2000).

Los análisis hidrológicos derivados del relieve, como dirección y magnitud del flujo, cuencas de contribución y redes naturales de drenaje, permiten además dimensionar canales, zanjas, bordos y reservorios con mayor fundamento técnico. Este enfoque integrado mejora la conservación del suelo, favorece la recarga de agua, reduce riesgos de inundación y optimiza el uso de la lluvia dentro del sistema productivo. En términos económicos, ello se traduce en menores costos de bombeo, menor deterioro del terreno y mayor estabilidad productiva frente a eventos intensos de precipitación. (Tarboton, 2003; Bilodeau et al., 2025).

En síntesis, la topografía no solo describe la forma del terreno, sino que proporciona una base cuantitativa para planificar con mayor precisión la ubicación de cultivos, infraestructuras y prácticas de manejo. Hoy, gracias a la disponibilidad de drones, SIG y modelos digitales del terreno de alta fidelidad, es posible transformar la variabilidad del paisaje en conocimiento práctico, incrementando rendimientos, reduciendo riesgos y promoviendo sistemas agrícolas más resilientes y ambientalmente responsables (ver figura 4). (Burrough & McDonnell, 1998; Farhan et al., 2024; Bilodeau et al., 2025).

Figura 4. *Modelo Digital de Elevación (DEM) generado por dron con curvas de nivel y zonas críticas de erosión.*



Fuente: Esta investigación.

El análisis detallado de la pendiente del terreno constituye un componente crítico para el diseño e implementación de sistemas agrícolas eficientes, ya que influye directamente en el desplazamiento del agua, la distribución de la radiación solar y la forma en que el manejo agronómico debe adaptarse al relieve. En terrenos con pendientes pronunciadas, por ejemplo, aumenta el riesgo de escorrentía superficial y erosión, lo que favorece la pérdida de nutrientes, desestabiliza la estructura del suelo y dificulta las labores de manejo. En estos contextos, suelen requerirse medidas como terrazas en contorno, drenajes superficiales o subterráneos y el uso de coberturas vegetales o especies adaptadas a ladera, con sistemas radicales capaces de mejorar el anclaje y la protección del suelo (Tarboton, 2003; Fu & Rich, 2002).

En contraste, las pendientes suaves y las zonas prácticamente planas facilitan la implantación de cultivos que demandan uniformidad espacial

en el manejo hídrico y mayor eficiencia en la mecanización. Estas áreas favorecen la distribución más homogénea del riego, reducen la necesidad de correcciones topográficas intensivas y simplifican labores como siembra, control y cosecha. Desde la perspectiva del manejo del agua, la topografía condiciona fuertemente la elección del sistema de riego: en laderas suelen preferirse esquemas localizados para limitar el escurrimiento, mientras que en áreas llanas pueden emplearse sistemas gravitacionales, surcos o inundación controlada, según el cultivo y el comportamiento hidráulico del suelo (Tarboton, 2003).

La topografía también desempeña un papel central en la conservación del suelo. En terrenos inclinados, la gravedad actúa como un agente erosivo permanente, por lo que prácticas como siembra en curvas a nivel, barreras vivas, coberturas vegetales y arreglos agroforestales se convierten en herramientas fundamentales para reducir la velocidad del agua, mejorar la infiltración y disminuir la pérdida de sedimentos. Estas decisiones no deben adoptarse de manera aislada, sino en función de la interacción entre pendiente, estabilidad estructural del suelo, drenaje y régimen climático, ya que es precisamente esa combinación la que determina la susceptibilidad real del predio a la degradación (Tarboton, 2003; U.S. Government Accountability Office, 2024).

Para orientar esta planificación, conviene considerar tres factores topográficos básicos. La pendiente regula la velocidad del escurrimiento y la intensidad de la erosión; la altitud modifica temperatura, presión atmosférica y duración del ciclo fenológico; y la orientación o exposición controla la cantidad de radiación solar recibida, con efectos sobre el microclima, la evaporación y el comportamiento del cultivo. La literatura sobre radiación topográfica muestra, además, que variaciones relativamente pequeñas en orientación y sombreado del relieve pueden producir gradientes locales importantes de temperatura e insolación, con implicaciones directas sobre crecimiento vegetal y balance hídrico (Fu & Rich, 2002).

La incorporación de sistemas de información geográfica y vehículos aéreos no tripulados ha transformado la capacidad de análisis topográfico en la agricultura moderna. Estas tecnologías permiten generar modelos tridimensionales del terreno, identificar áreas críticas y planificar intervenciones con un nivel de detalle mucho mayor que el disponible con métodos convencionales. De forma complementaria, el uso de GPS/GNSS de alta precisión, fotogrametría digital y sensores multiespectrales ha incrementado la exactitud del levantamiento del relieve incluso en terrenos complejos, montañosos o de difícil acceso, fortaleciendo su utilidad para la AP (Farhan et al., 2024; Martínez-Carricondo et al., 2023).

Las imágenes aéreas obtenidas con drones no solo permiten describir la forma del terreno, sino también detectar microrelieves, cárcavas incipientes, cambios sutiles de pendiente y patrones espaciales que con frecuencia pasan inadvertidos en estudios de baja resolución. Cuando esta información se integra con plataformas SIG, puede combinarse con datos de cultivo, humedad o fertilidad para elaborar mapas de prescripción de riego, fertilización o manejo fitosanitario, mejorando la eficiencia del sistema agronómico y reduciendo la aplicación innecesaria de insumos (Farhan et al., 2024; U.S. Government Accountability Office, 2024).

Una vez levantados, los datos topográficos deben procesarse y modelarse para generar productos cartográficos útiles para la toma de decisiones. Los modelos digitales de elevación permiten derivar mapas de pendiente, curvatura, orientación, acumulación y dirección de flujo, todos ellos esenciales para identificar zonas con riesgo de erosión, estancamiento hídrico o concentración de escorrentía. Sobre esta base pueden diseñarse drenajes, caminos rurales, obras de contención, reservorios y otras infraestructuras que respeten el relieve natural y aprovechen mejor las dinámicas hidrológicas del predio. En ese sentido, la topografía aporta una base cuantitativa indispensable para vincular manejo agronómico, ingeniería rural y conservación del paisaje (Tarboton, 2003).

No obstante, el trabajo con datos topográficos también presenta desafíos. Los costos de adquisición de equipos de alta precisión, las exigencias de procesamiento, la dependencia de buena señal satelital y la necesidad de personal capacitado pueden limitar su uso, especialmente en territorios rurales con infraestructura restringida. Aun así, la tendencia reciente apunta a una democratización gradual de estas tecnologías, impulsada por equipos más accesibles, software de código abierto y plataformas de análisis cada vez más integradas. En conjunto, estos avances están permitiendo que el relieve deje de ser visto como una restricción pasiva y pase a convertirse en una variable estratégica para diseñar sistemas agrícolas, forestales, agroforestales y pecuarios más productivos, resilientes y ambientalmente responsables (Trendov et al., 2019; U.S. Government Accountability Office, 2024).

El análisis y aprovechamiento de la topografía es mucho más que una etapa previa al cultivo: es una herramienta estratégica para transformar la variabilidad del terreno en una ventaja competitiva. Cuando se interpreta adecuadamente y se integra con información climática, edáfica y productiva, permite optimizar recursos, reducir riesgos y fortalecer la sostenibilidad del sistema en un contexto marcado por el cambio climático y la necesidad de producir con mayor precisión y menor impacto (Fu & Rich, 2002; Farhan et al., 2024; Tarboton, 2003).

10. Integración y análisis de datos básicos: suelo, clima y topografía

La integración y el análisis de datos agroambientales constituyen pilares fundamentales de la gestión moderna de cultivos, especialmente dentro de enfoques como la AP, donde la toma de decisiones debe sustentarse en información multivariable, georreferenciada y oportuna. Este proceso no solo permite optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y maquinaria, sino que también mejora la productividad, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia del sistema frente a restricciones como la variabilidad climática y la heterogeneidad del terreno. La lógica central consiste en transformar capas dispersas de información en unidades

operativas de manejo, capaces de orientar decisiones agronómicas con mayor precisión.

En este contexto, la combinación de datos topográficos, edáficos y climáticos, junto con registros históricos del manejo agrícola, permite construir un modelo funcional del predio que describe no solo la forma del terreno, sino también su comportamiento productivo y ambiental. La superposición de estas capas facilita la detección de patrones espaciales y temporales que difícilmente podrían reconocerse mediante observación directa, tales como gradientes de fertilidad, zonas de escurrimiento preferencial, áreas con limitaciones hídricas recurrentes o sectores de bajo rendimiento persistente. Este tipo de integración resulta especialmente útil cuando se busca delimitar unidades relativamente homogéneas para el manejo sitio-específico.

Uno de los primeros pasos para lograrlo es la construcción de una base cartográfica confiable, generalmente sustentada en modelos digitales de elevación de alta resolución obtenidos mediante fotogrametría con drones, sensores LiDAR o combinación de datos GPS/GNSS e imágenes remotas. Cuando esta base se integra con variables del suelo como textura, profundidad efectiva, materia orgánica o capacidad de retención de agua y con información climática y productiva precipitación, temperatura, rendimiento, fechas de siembra o incidencia de plagas, se convierte en una herramienta de diagnóstico y planificación territorial de alto valor agronómico.

La topografía, en particular, influye sobre múltiples procesos relevantes para el desempeño del cultivo. Regula la dirección del flujo superficial, define áreas de acumulación o pérdida de agua y nutrientes, modifica la exposición solar y condiciona la factibilidad de infraestructura y mecanización. Por ello, su lectura conjunta con el suelo y el clima no solo ayuda a identificar las zonas más aptas para determinados cultivos, sino también a seleccionar el tipo de manejo más conveniente dentro de cada unidad espacial del predio. En AP, esta articulación es la base sobre la cual se establecen unidades de manejo que integran información relativamente estable y predictiva en el tiempo.

Una metodología ampliamente utilizada para materializar esta integración es el mapeo de zonas homogéneas o zonas de manejo. Este enfoque consiste en dividir el terreno en áreas con condiciones similares en términos de pendiente, textura, propiedades del suelo, régimen hídrico, vigor del cultivo y otros factores estrechamente relacionados con el rendimiento y la respuesta a los insumos. La literatura muestra que estas zonas pueden mejorar el diseño del muestreo, facilitar la fertilización variable y representar, de manera más eficiente que el muestreo uniforme, la heterogeneidad interna del campo.

La delimitación de zonas homogéneas puede realizarse mediante interpolación espacial, análisis multivariado y métodos de clasificación o agrupamiento, como fuzzy c-means, análisis de componentes principales o algoritmos de clustering aplicados a capas de suelo, topografía, vegetación y rendimiento. En este punto, los sistemas de información geográfica resultan esenciales porque permiten integrar, visualizar y analizar simultáneamente múltiples fuentes de información espacial. Además, herramientas analíticas más recientes han facilitado la limpieza de datos crudos, la interpolación automática de variables y la generación de mapas de variabilidad y zonas de manejo en entornos más accesibles para el usuario.

En términos prácticos, esta integración permite identificar áreas con riesgo de erosión, compactación, salinidad o anegamiento, así como sectores con bajo rendimiento crónico o alto potencial productivo bajo condiciones específicas de manejo. En consecuencia, el análisis conjunto de suelo, clima y topografía no debe verse como una etapa descriptiva aislada, sino como el fundamento técnico para diseñar estrategias de intervención diferenciada, reducir incertidumbre y aumentar la eficiencia agronómica del sistema productivo (Ver tabla 8).

Tabla 8. *Técnicas comunes aplicadas a la integración y análisis*

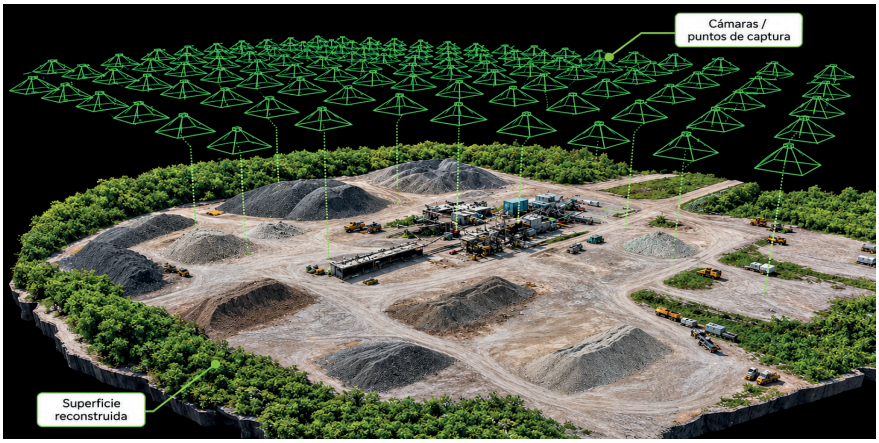
Técnica	Descripción	Aplicación principal	Beneficio agronómico
Mapeo de zonas homogéneas	Segmentación del terreno con base en criterios técnicos y variables espaciales, con el fin de delimitar unidades relativamente uniformes de manejo como se muestra en la fotogrametria de la figura 5.	Definir áreas de manejo diferenciado y ajustar la aplicación de insumos según necesidades específicas	Mejora la eficiencia en el uso de fertilizantes, agua y otros insumos, y reduce impactos ambientales
Modelos de simulación	Uso de software especializado, como DSSAT, AquaCrop o APSIM, para representar escenarios agronómicos a partir de variables climáticas, edáficas y de manejo	Evaluar el comportamiento potencial de los cultivos bajo diferentes condiciones productivas y ambientales	Optimiza la toma de decisiones a mediano y largo plazo y permite anticipar respuestas del cultivo
Análisis de riesgos	Evaluación de la probabilidad de eventos extremos y limitantes productivas a partir de datos históricos climáticos y de fertilidad del suelo	Identificar riesgos como sequías, heladas, lluvias intensas o deficiencias nutricionales, e integrarlos en alertas o matrices de priorización	Reduce pérdidas potenciales, fortalece la resiliencia productiva y mejora la planificación del manejo

Fuente: Esta Investigación.

Adicionalmente, los avances recientes en tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático, están ampliando de manera significativa la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos agroambientales. Estas herramientas permiten identificar patrones no evidentes, mejorar la delimitación de zonas homogéneas y generar recomendaciones de manejo cada vez más ajustadas a la escala del lote o la parcela. En AP, su valor radica en que transforman conjuntos complejos de datos de suelo, clima, relieve y cultivo en decisiones operativas más rápidas, específicas y consistentes (Chlingaryan et al., 2018; Fenu & Malloci, 2021).

La integración de datos, sin embargo, no debe concebirse como un proceso estático, sino como un sistema dinámico de retroalimentación continua. En este enfoque, la información recopilada en cada ciclo productivo se utiliza para refinar modelos, contrastar hipótesis agronómicas y ajustar las recomendaciones futuras. Por ello, la captura permanente de datos mediante sensores in situ, estaciones meteorológicas, plataformas de monitoreo remoto y registros históricos es esencial para mantener actualizado el sistema de información agrícola y mejorar progresivamente su capacidad predictiva y prescriptiva (FAO, 2019; Kumar et al., 2024).

Figura 5. *Fotogrametría con modelos de simulación para análisis de riesgos*



Fuente: Modificado de Pix4D (2025).

Finalmente, para que este proceso resulte exitoso, debe estar acompañado por capacitación técnica, inversión en infraestructura digital y acceso efectivo a plataformas de análisis geoespacial por parte de equipos técnicos y productores. Solo bajo estas condiciones la información recopilada puede convertirse en conocimiento útil y aplicable, capaz de fortalecer la toma de decisiones estratégicas y de impulsar una agricultura más rentable, equitativa y sostenible. En ausencia de estas capacidades habilitantes, incluso las herramientas más avanzadas tienden a subutilizarse o a profundizar

brechas tecnológicas preexistentes entre territorios y productores (FAO, 2019; Kumar et al., 2024).

Una vez delimitadas las zonas homogéneas de manejo, la fase siguiente consiste en implementar modelos de simulación agroecológica capaces de anticipar el comportamiento de cada unidad espacial bajo distintos escenarios productivos, climáticos y de manejo. Estas herramientas computacionales, consolidadas desde finales del siglo XX en universidades y centros de investigación, integran variables físicas del terreno, propiedades químicas del suelo y factores climáticos para representar de manera dinámica los flujos de agua, energía y nutrientes en el sistema suelo–cultivo–atmósfera. En esencia, convierten series históricas y datos actuales en escenarios predictivos que apoyan la toma de decisiones estratégicas a escala de lote, finca o cuenca (Jones et al., 2003; Keating et al., 2003; Steduto et al., 2009).

En términos operativos, estos modelos permiten explorar cómo cambia el rendimiento potencial cuando se modifican variables de manejo como fecha de siembra, disponibilidad hídrica, densidad de población o fertilización nitrogenada. De esta forma, el equipo técnico puede contrastar escenarios de producción bajo distintas combinaciones de pendiente, textura, temperatura, precipitación y capacidad de retención de agua, y evaluar de manera anticipada cuáles estrategias ofrecen mayor eficiencia y estabilidad. En cultivos como maíz, por ejemplo, tanto DSSAT como APSIM han sido ampliamente utilizados para analizar respuestas del cultivo al agua y al nitrógeno, así como para estimar compromisos entre rendimiento, uso de recursos y riesgo climático (Jones et al., 2003; Archontoulis et al., 2020).

Además de optimizar decisiones de corto plazo, los modelos de simulación resultan especialmente valiosos para planificar rotaciones y evaluar la sostenibilidad edáfica en horizontes más largos. Al simular secuencias de cultivos, pueden estimar la dinámica del carbono y del nitrógeno en el perfil, prever balances nutrimentales y comparar el efecto de distintas rotaciones sobre la fertilidad, el riesgo de lixiviación o la

necesidad de insumos externos. Esto permite diseñar sistemas más estables desde el punto de vista productivo y ambiental, con menor dependencia de fertilización sintética y mejor capacidad de conservación del recurso suelo (Keating et al., 2003; Steduto et al., 2009).

La frontera más avanzada de esta aproximación corresponde a la simulación casi en tiempo real, alimentada por flujos continuos de datos provenientes de sensores de humedad, estaciones meteorológicas automáticas, imágenes satelitales y plataformas IoT. Esta retroalimentación permite recalibrar parámetros, mejorar el seguimiento del estado del cultivo y generar alertas operativas más oportunas. En sistemas de riego inteligente, por ejemplo, la combinación de sensores de humedad del suelo, pronóstico meteorológico y algoritmos de decisión puede ajustar láminas y frecuencias de riego con un nivel de precisión imposible de lograr mediante esquemas fijos de calendario (Kumar et al., 2024; Steduto et al., 2009).

Los modelos de simulación también se complementan con análisis integrales de riesgo, orientados a identificar amenazas climáticas, edáficas y topográficas y a priorizar intervenciones de mitigación. Sequías recurrentes, heladas tardías, lluvias intensas, erosión acelerada o pérdida progresiva de fertilidad pueden integrarse en esquemas de evaluación multicriterio para estimar vulnerabilidad y orientar inversiones. En este punto, índices como el Palmer Drought Severity Index, las curvas intensidad–duración–frecuencia o los mapas de susceptibilidad a erosión permiten traducir series de datos complejas en herramientas concretas para la gestión del riesgo agrícola (Cavus et al., 2020; Hua et al., 2025).

El proceso suele iniciarse con la recopilación y depuración de series climáticas y productivas suficientemente extensas, combinadas con información topográfica, fertilidad del suelo y antecedentes de manejo. A partir de estas bases se construyen mapas de vulnerabilidad que integran pendiente, clima, drenaje, salinidad, acidez y comportamiento histórico del rendimiento. Estas representaciones espaciales permiten focalizar mejor los recursos y justificar intervenciones como terrazas en laderas

críticas, riego presurizado en zonas de alta probabilidad de déficit hídrico o enmiendas correctivas en suelos con limitaciones químicas persistentes (Cavus et al., 2020; Jones et al., 2003).

Para la mitigación de riesgos en tiempo real, las plataformas IoT conectadas mediante redes de baja potencia y amplio alcance han ampliado notablemente la capacidad de vigilancia del sistema productivo. Sensores de temperatura, humedad relativa, punto de rocío y humedad del suelo pueden transmitir datos de manera continua y alimentar servicios de alerta temprana frente a heladas, déficit hídrico o condiciones favorables para enfermedades. En frutales y otros sistemas de alto valor, estos desarrollos ya se utilizan para activar medidas de protección como microaspersión antihelada, ventilación forzada o riego oportuno, reduciendo de forma importante el daño potencial cuando la alerta es suficientemente anticipada (Hua et al., 2025; FAO, 2005).

En terrenos con alta pendiente, el análisis de vulnerabilidad también permite identificar áreas con elevado riesgo de erosión y justificar estrategias de conservación como labranza mínima, cultivos de cobertura y barreras vegetativas. Dentro de estas últimas, Vetiveria zizanioides ha mostrado alta eficacia para reducir escorrentía y retener sedimentos cuando se establece adecuadamente en franjas de contorno. Del mismo modo, en suelos ácidos o con limitaciones químicas severas, los modelos de apoyo a la decisión pueden sugerir combinaciones de encalado, enmiendas orgánicas y manejo de cobertura para mejorar la saturación de bases, reducir toxicidad por aluminio y restaurar gradualmente la funcionalidad del suelo (Leknoi et al., 2021; Brady & Weil, 2017).

En conjunto (ver tabla 9), la simulación agroecológica y el análisis de riesgo convierten la información del predio en una herramienta prospectiva de alto valor. Su verdadera fortaleza no reside únicamente en describir lo que ocurre en el sistema, sino en anticipar lo que podría ocurrir bajo distintos escenarios y, a partir de ello, orientar decisiones más seguras, eficientes y sostenibles en contextos de creciente incertidumbre climática y productiva (Jones et al., 2003; Keating et al., 2003; Kumar et al., 2024).

Tabla 9. *Estrategias de integración, simulación y alerta para la toma de decisiones en AP*

Estrategia o herramienta	Descripción	Aplicación principal	Beneficio esperado
Integración SIG + modelos	Facilita la superposición de mapas de pendiente, clases texturales, zonas de estrés hídrico y pronósticos climáticos, generando prescripciones de manejo a escala de subparcela	Delimitar unidades de manejo y ajustar decisiones agronómicas según la variabilidad espacial del terreno	Mejora la precisión del manejo y optimiza el uso de insumos
Simulación multi escenario	Permite comparar distintas estrategias de manejo, como riego gravitacional frente a goteo o fertilización convencional frente a variable, bajo escenarios climáticos proyectados	Evaluar el efecto de cambios en temperatura y precipitación sobre rendimiento, costos y respuesta del cultivo	Facilita la selección de alternativas más eficientes y rentables
Alertas tempranas	Uso de sensores y algoritmos de aprendizaje automático para detectar eventos críticos y reducir el tiempo entre ocurrencia y respuesta	Activar acciones rápidas frente a sequía, heladas, exceso de humedad o estrés del cultivo	Disminuye pérdidas y mejora la capacidad de respuesta del productor
Planificación de rotaciones	Diseño de secuencias de cultivos orientadas a optimizar la dinámica de nutrientes y la salud del suelo	Mejorar fertilidad, reducir agotamiento del suelo y sostener la productividad en el tiempo	Favorece rentabilidad sostenida y resiliencia socioambiental

Fuente: Esta Investigación.

La **sinergia entre modelos de simulación, análisis de riesgos y monitoreo en tiempo real** convierte los datos en **inteligencia operativa**, posibilitando un manejo agrícola que, además de productivo, sea respetuoso con la biodiversidad y preparado para los desafíos climáticos venideros. Así, la agricultura colombiana y latinoamericana en general puede

transitar desde la tradicional gestión "reactiva" a un paradigma **proactivo y anticipatorio**, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con las exigencias de un mercado global cada vez más orientado a la trazabilidad y sostenibilidad de la producción.

11. Relevancia económica y social en la evaluación agroproductiva

La evaluación técnica y diagnóstica del cultivo y del terreno no solo constituye una etapa metodológica esencial en la planificación agrícola moderna, sino que también posee implicaciones económicas y sociales profundas que deben analizarse de manera integrada. Desde el punto de vista financiero, este proceso permite identificar con mayor claridad los recursos materiales, humanos y tecnológicos requeridos durante el ciclo productivo, así como proyectar con mayor precisión los costos, riesgos y márgenes esperados. Esta capacidad de anticipación reduce la incertidumbre, mejora la eficiencia en el uso de recursos y fortalece la viabilidad económica de productores de distinta escala. La literatura sobre AP ha mostrado que el uso de información espacial y manejo diferenciado puede elevar la eficiencia y contribuir a mejores resultados económicos cuando se integra adecuadamente al sistema productivo.

En el ámbito social, la evaluación agroproductiva se convierte en una herramienta de dinamización del desarrollo rural, en la medida en que orienta decisiones más sostenibles, fortalece capacidades locales y mejora la articulación entre actores del territorio. Cuando este proceso incorpora participación, transferencia de conocimiento y acceso a información útil, puede favorecer la inclusión de pequeños productores, mujeres rurales y jóvenes en dinámicas de innovación y toma de decisiones. La FAO ha subrayado que la digitalización agrícola solo genera impactos positivos amplios cuando va acompañada de formación, inclusión y desarrollo de capacidades, particularmente en poblaciones rurales tradicionalmente rezagadas frente al acceso tecnológico (FAO, 2016).

12. Sostenibilidad e impactos ambientales como eje transversal

En un contexto atravesado por crisis ecológicas crecientes y por la intensificación de los riesgos climáticos, la evaluación inicial adquiere un papel protagónico como herramienta de planificación para la sostenibilidad agroambiental. Identificar con precisión las limitaciones físicas, químicas y biológicas del suelo, así como los riesgos asociados al uso del agua, la degradación del territorio y la variabilidad climática, permite diseñar respuestas adaptativas más eficaces y localmente pertinentes. Bajo esta lógica, la evaluación inicial no solo describe el estado del sistema, sino que orienta intervenciones preventivas y correctivas que fortalecen la resiliencia del agroecosistema.

Este enfoque facilita la adopción de prácticas ajustadas a las condiciones reales del predio, como riego tecnificado basado en monitoreo, rotaciones según la dinámica del suelo, coberturas vegetales estratégicas o ajustes localizados de fertilización. Tales decisiones, cuando derivan de un diagnóstico bien fundamentado, pueden generar beneficios simultáneos: aumentar la eficiencia productiva, reducir emisiones, mejorar el uso del agua y conservar recursos naturales clave para la continuidad del sistema. En este sentido, la evaluación inicial funciona como un puente entre productividad y sostenibilidad, y se alinea con el principio de intensificación sostenible que subyace a buena parte de la AP.

Las acciones derivadas de una evaluación técnica rigurosa trascienden, por tanto, lo estrictamente agronómico. No solo contribuyen a mejorar la rentabilidad del productor y reducir su exposición a pérdidas, sino que también apoyan procesos de mitigación y adaptación frente al cambio climático, conservación del suelo y del agua, y fortalecimiento de territorios agrícolas más estables y resilientes. Vista desde esta perspectiva, la evaluación inicial constituye tanto un instrumento de análisis técnico como una decisión ética y estratégica a favor de la sostenibilidad de largo plazo.

A lo largo de este capítulo se ha puesto en evidencia que la evaluación inicial opera como un eje articulador entre tecnología, gestión agronómica y sostenibilidad territorial. La AP, entendida no simplemente como un conjunto de dispositivos, sino como una filosofía de manejo basada en datos, adaptabilidad y diferenciación espacial, ofrece una vía concreta para optimizar la producción sin perder de vista las restricciones ecológicas y sociales del territorio. Su aporte principal radica en reemplazar decisiones uniformes e intuitivas por intervenciones más precisas, contextualizadas y sustentadas en evidencia.

El enfoque parcelario y el uso de datos espaciales y temporales representan, en efecto, una ruptura con los esquemas tradicionales de agricultura homogénea. La capacidad de intervenir con mayor precisión sobre fertilización, riego, control fitosanitario y zonificación productiva mejora la eficiencia del sistema y reduce externalidades ambientales. En países como Colombia, donde confluyen alta variabilidad climática, desigualdad en el acceso a tecnologías y fragmentación territorial, este enfoque también puede contribuir a cerrar brechas productivas y fortalecer procesos de innovación rural más inclusivos, siempre que su implementación se adapte a las condiciones locales.

No obstante, la adopción masiva y efectiva de la AP no ocurre de manera automática. Su consolidación depende de procesos graduales, participativos y territorialmente contextualizados que consideren factores culturales, sociales, económicos y tecnológicos. Entre las principales barreras identificadas en la literatura se encuentran los altos costos iniciales, la limitada alfabetización digital, la conectividad deficiente, el acceso restringido al crédito y la débil articulación entre productores, Estado, academia y sector privado. En consecuencia, el potencial transformador de estas herramientas no descansa solo en la tecnología disponible, sino en la capacidad institucional y social para hacerla accesible, útil y sostenible en distintos contextos rurales. Frente a ello, se propone una agenda prospectiva de transformación tecnológica centrada en los siguientes ejes (ver tabla 10):

Tabla 10. *Ejes estratégicos para una agenda prospectiva de transformación tecnológica en el agro*

Eje estratégico	Descripción	Propósito principal
Modelos de negocio inclusivos	Creación de servicios por suscripción, redes de cooperación tecnológica rural y mecanismos de financiamiento orientados a pequeños productores	Facilitar el acceso equitativo a tecnologías de AP y reducir barreras económicas de adopción
Tecnologías abiertas y accesibles	Impulso a plataformas y dispositivos de bajo costo, de código abierto y adaptables a distintos contextos productivos	Democratizar el acceso a herramientas tecnológicas y favorecer su uso en diversos entornos rurales
Educación rural integral	Inversión en programas de formación técnica, alfabetización digital y fortalecimiento de capacidades locales en análisis de datos y gestión territorial	Mejorar las competencias de productores y equipos técnicos para una adopción efectiva de la tecnología
Infraestructura habilitante	Ampliación de la conectividad digital, acceso confiable a energía y construcción de centros rurales de innovación tecnológica	Crear condiciones básicas para el funcionamiento y sostenibilidad de los sistemas digitales en el campo
Interoperabilidad tecnológica	Establecimiento de estándares abiertos para integrar de manera eficiente datos, sensores y plataformas	Garantizar un ecosistema tecnológico coherente, funcional y compatible
Políticas públicas de incentivo	Diseño de marcos normativos que promuevan la adopción de AP, protejan la privacidad de los datos y fomenten la investigación aplicada	Respaldar institucionalmente la innovación tecnológica en contextos rurales
Participación activa de los agricultores	Involucramiento de los productores en el diseño, prueba y evaluación de tecnologías	Asegurar que las soluciones tecnológicas sean culturalmente pertinentes, productivamente relevantes y socialmente apropiables

Fuente: Esta Investigación.

Síntesis final

El capítulo 2 puso en evidencia que la evaluación inicial del cultivo y del terreno no es una fase preliminar secundaria, sino el fundamento técnico sobre el cual se construyen decisiones agronómicas sólidas, sostenibles y territorialmente pertinentes. A lo largo del desarrollo temático se demostró que conocer con precisión el estado físico, químico y biológico del suelo, junto con el comportamiento climático y la configuración topográfica del predio, permite comprender la heterogeneidad real del sistema productivo y anticipar sus principales limitaciones y potencialidades. En este sentido, la evaluación inicial constituye el punto de partida para transformar la observación dispersa en conocimiento estructurado y útil para la gestión agrícola.

Uno de los aportes centrales del capítulo fue mostrar que suelo, clima y topografía no deben analizarse de manera aislada, sino como componentes interdependientes que condicionan simultáneamente la productividad, el uso del agua, la dinámica de nutrientes, la viabilidad del manejo y la exposición al riesgo. Desde esta perspectiva, la evaluación inicial adquiere un carácter integrador: no solo permite clasificar la aptitud del terreno, sino también diseñar estrategias de manejo específico por sitio, delimitar zonas homogéneas, construir mapas temáticos y orientar decisiones sobre riego, fertilización, conservación y selección de cultivos o variedades. El diagnóstico deja así de ser descriptivo para convertirse en una herramienta operativa de planificación.

El capítulo también evidenció que la AP encuentra en esta fase diagnóstica uno de sus soportes más importantes. La incorporación de sensores, plataformas SIG, modelos digitales de elevación, estaciones meteorológicas, análisis geoestadístico, simulación y herramientas de inteligencia artificial amplía significativamente la capacidad de interpretar la variabilidad del predio y de convertir datos en recomendaciones de manejo más precisas. Sin embargo, también se remarcó que la utilidad de estas tecnologías depende de su correcta contextualización, de la calidad de

los datos recolectados y de la capacidad técnica de quienes los interpretan y aplican. Por ello, la evaluación inicial no puede reducirse a una recopilación instrumental de información, sino que exige criterio agronómico, lectura territorial y articulación entre conocimiento científico y experiencia local.

Finalmente, el capítulo dejó claro que evaluar bien desde el inicio significa producir con mayor responsabilidad. Una evaluación rigurosa disminuye la incertidumbre, reduce el riesgo de inversiones ineficientes, mejora la sostenibilidad del sistema y fortalece la resiliencia frente a condiciones de cambio climático, degradación de tierras y presión sobre los recursos naturales. En consecuencia, la evaluación inicial del cultivo y del terreno debe entenderse como una práctica estratégica, no solo para incrementar la productividad, sino también para orientar una agricultura más inteligente, inclusiva y ambientalmente comprometida.

Ejercicios prácticos y de discusión

Estos ejercicios están diseñados para profundizar la comprensión, así como para fomentar el análisis crítico de sus implicaciones en el contexto agrícola moderno.

Ejercicio 1. Diseño de un plan de evaluación inicial para una finca diversificada

Objetivo: Aplicar los conocimientos sobre la evaluación inicial del suelo, clima y topografía para diseñar un plan integral en un escenario agrícola complejo.

Instrucciones: Se les presenta el siguiente escenario a los estudiantes: "Ustedes son un equipo de consultores agrícolas contratados para desarrollar un plan de evaluación inicial para la 'Finca La Esperanza', ubicada en una zona de transición climática con topografía variada. La finca tiene 75 hectáreas y actualmente cultiva café en laderas, aguacate en zonas de media pendiente y hortalizas bajo riego en áreas

planas. El propietario desea optimizar la producción, reducir el uso de insumos y mejorar la sostenibilidad ambiental."

1. Diseñen un protocolo detallado de evaluación inicial que incluya:

- Identificación de los datos clave a recolectar para cada componente (suelo, clima, topografía).
- Metodologías y herramientas específicas (tradicionales y de AP) que utilizarían para la recolección de cada tipo de dato (ej., tipo de muestreo de suelo, sensores climáticos, métodos topográficos).
- Justificación de la selección de cada herramienta y metodología en función de la diversificación de cultivos y las características del terreno.
- Propuesta de un cronograma estimado para la fase de evaluación.

2. Identifiquen al menos tres posibles "puntos críticos" (limitaciones o desafíos) que podrían encontrar durante esta evaluación inicial, considerando la diversidad de cultivos y la variabilidad del terreno.

3. Propongan cómo la "agricultura específica por sitio" se aplicaría en la "Finca La Esperanza" una vez que se tengan los datos de la evaluación inicial.

Discusión / Preguntas para reflexión:

- ¿Cómo priorizarían la recolección de datos si el presupuesto fuera limitado?
- ¿Qué desafíos logísticos y técnicos anticipan al aplicar estas metodologías en un terreno tan diverso?
- ¿Cómo asegurarían la participación y el entendimiento del propietario de la finca en este proceso de evaluación?

- ¿Qué tipo de análisis de datos realizarían para integrar la información de suelo, clima y topografía de manera efectiva?

Ejercicio 2. Simulación de gestión de riesgos climáticos con datos de AP

Objetivo: Comprender cómo los datos climáticos y las herramientas de AP pueden mitigar riesgos en un escenario de cambio climático.

Instrucciones: Imagine que usted es el gerente de una finca de café en una región que históricamente ha tenido patrones de lluvia estables, pero que en los últimos 5 años ha experimentado sequías más prolongadas y heladas ocasionales.

1. Describan los datos climáticos específicos que considerarían esenciales para monitorear en tiempo real y a largo plazo para esta finca.

2. Identifiquen al menos dos tecnologías de AP (mencionadas en el capítulo o investigadas) que implementarían para la recolección de estos datos. Justifiquen su elección.

3. Propongan un "protocolo de alerta temprana" basado en estos datos, que les permita anticipar una sequía o una helada inminente. ¿Qué umbrales de datos activarían una alerta?

4. Describan dos acciones agronómicas preventivas que implementarían en respuesta a cada tipo de alerta (sequía y helada) para minimizar el impacto en el cultivo de café.

Materiales: Acceso a información sobre riesgos climáticos en cultivos específicos (ej., café).

Discusión / Preguntas para reflexión:

- ¿Cómo se integrarían estos datos climáticos con los datos de suelo y topografía para una gestión de riesgos más holística?
- ¿Cuál es el costo-beneficio de invertir en tecnologías de monitoreo climático para la gestión de riesgos?
- ¿Cómo se comunicarían estas alertas y acciones a los trabajadores del campo?
- ¿Qué papel juega la resiliencia genética de los cultivos en la mitigación de riesgos climáticos?

Referencias

AKRA. (2002). *Muestreo: ¡la base de resultados precisos analíticos!* Soilbook. https://www.soilbook.info/assets/bewusstseinsbildung/probenahme_es-120702ee020002d1ca2300a8a89391a4a7953d769dd8e07874c3e7869099c4aa.pdf

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Archontoulis, S. V., Castellano, M. J., Licht, M. A., Nichols, V., Baum, M., Huber, I., Martinez-Feria, R., Puntel, L., Ordóñez, R. A., Iqbal, J., Wright, E. E., Dietzel, R. N., Helmers, M., Vanloocke, A., Liebman, M., Hatfield, J. L., Herzmann, D., Córdova, S. C., Edmonds, P., … Lamkey, K. R. (2020). Predicting crop yields and soil-plant nitrogen dynamics in the US Corn Belt. Crop Science, 60(2), 721–738. https://doi.org/10.1002/csc2.20039

Bilodeau, M. F., Esau, T. J., Zaman, Q. U., Heung, B., & Farooque, A. A. (2025). Using drones to predict degradation of surface drainage on agricultural

fields: A case study of the Atlantic Dykelands. *AgriEngineering, 7*(4), Article 112. https://doi.org/10.3390/agriengineering7040112

Bönecke, E., Meyer, S., Vogel, S., Schröter, I., Gebbers, R., Kling, C., Kramer, E., Lück, K., Nagel, A., Philipp, G., Gerlach, F., Palme, S., Scheibe, D., Zieger, K., & Rühlmann, J. (2021). Guidelines for precise lime management based on high-resolution soil pH, texture and SOM maps generated from proximal soil sensing data. *Precision Agriculture, 22*, 1–31. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09766-8

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture, 5*(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

Born, L., Prager, S., Ramirez-Villegas, J., & Imbach, P. (2021). A global meta-analysis of climate services and decision-making in agriculture. *Climate Services, 22*, Article 100231. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100231

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.

CABI. (2022). *Phytophthora infestans* (Phytophthora blight). *CABI Compendium*. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.40970

Cavus, Y., & Aksoy, H. (2020). Critical drought severity/intensity-duration-frequency curves based on precipitation deficit. Journal of Hydrology, 584, Article 124312. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124312

Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in

precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture, 151*, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012

Farhan, S. M., Shariff, A. R. M., Ndzi, D. L., & Ahmadon, M. A. (2024). A comprehensive review of LiDAR applications in crop cultivation and harvests. *Sensors, 24*(16), Article 5409. https://doi.org/10.3390/s24165409

Fenu, G., & Malloci, F. M. (2021). Lands DSS: A decision support system for precision farming. *Smart Agricultural Technology, 1*, Article 100017. https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100017

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & International Telecommunication Union. (2016). E-agriculture strategy guide: Piloted in Asia-Pacific countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/i5564e/i5564e.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Using climate services in adaptation planning for the agriculture sectors*. FAO. https://www.fao.org/3/cb2453en/CB2453EN.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *Creating opportunities for youth and women with digital agriculture*. FAO. https://www.fao.org/science-technology-and-innovation/resources/stories/creating-opportunities-for-youth-and-women-with-digital-agriculture/en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Why IoT, big data & smart farming are the future of agriculture*. FAO e-Agriculture. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://www.fao.org/e-agriculture/news/why-iot-big-data-smart-farming-are-future-agriculture

Fu, P., & Rich, P. M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture, 37*(1–3), 25–35. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1

Gardiner, B., Berry, P., & Moulia, B. (2016). Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science, 245*, 94–118. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science, 327*(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Global Facility for Disaster Reduction and Recovery - GFDRR (2015). *Digital elevation models: A guidance note on sources and applications*. World Bank. https://www.gfdrr.org/en/publication/digital-elevation-models-guidance-note-sources-and-applications

Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., Thomson, A. M., & Wolfe, D. W. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal, 103*(2), 351–370. https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303

Hua, W., Heinemann, P., & He, L. (2025). Frost management in agriculture with advanced sensing, modeling, and artificial intelligent technologies: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 231, Article 110027. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110027

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 18(3–4), 235–265. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7

Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E.,

Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., ... Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems

simulation. European Journal of Agronomy, 18(3–4), 267–288. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9

Kumar, V., Dash, K. K., Smith, R., & Singh, S. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT, AI, and data analytics. *Smart Agricultural Technology, 8*, Article 100092. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100092

Leknoi, U., & Likitlersuang, S. (2020). Good practice and lesson learned in promoting vetiver as solution for slope stabilisation and erosion control in Thailand. Land Use Policy, 99, Article 105008. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105008

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., & Carvajal-Ramírez, F. (2023). Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GPS/GNSS fixed base stations. *Geocarto International, 38*(1), Article 2197507. https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2023). Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry for precision agriculture. *International Journal of Digital Earth, 16*(1), 1–19.

McFadden, J., Casalini, F., Griffin, T., & Antón, J. (2022). *The digitalisation of agriculture: A literature review and emerging policy issues* (OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers No. 176). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/285cc27d-en

Moeys, J., Shangguan, W., Petzold, R., Minasny, B., Rosca, B., Jelinski, N., Zelazny, W., Souza, R. M. S., Safanelli, J. L., & ten Caten, A. (2024). *soiltexture: Functions for soil texture plot, classification and transformation* (Version

1.5.3) [Paquete de R]. Comprehensive R Archive Network. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.soiltexture

Moore, C. E., Meacham-Hensold, K., Lemonnier, P., Slattery, R. A., Benjamin, C., Bernacchi, C. J., Lawson, T., & Cavanagh, A. P. (2021). The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: From enzymes to ecosystems. *Journal of Experimental Botany, 72*(8), 2822–2844. https://doi.org/10.1093/jxb/erab090

National Aeronautics and Space Administration. (2022). *NASA POWER: Prediction of Worldwide Energy Resources*. NASA Langley Research Center. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://power.larc.nasa.gov/

Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers & Geosciences, 30*(7), 683–691. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012

Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management, 147*, 4–20. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031

Pérez-Ortega, D. J., Bolaños-Alomia, F. A. y Silva, A. M. (2022). Variables que influyen en la aplicación de la agricultura de precisión en Colombia: revisión de estudios. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23*(1), e2298. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2298

Pix4D. (2025). *Menu View > rayCloud > 3D View: PIX4Dmapper* [Documento web con imagen técnica]. Pix4D Support. https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557999

Rijswijk, K., Klerkx, L., Bacco, M., Bartolini, F., Bulten, E., Debruyne, L., Dessein, J., Scotti, I., & Brunori, G. (2021). Digital transformation of agriculture and rural areas: A socio-cyber-physical system framework to support responsibilisation. *Journal of Rural Studies, 85*, 79–90. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.05.003

Sáiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy, 10*(2), Article 207. https://doi.org/10.3390/agronomy10020207

Snyder, R. L., & de Melo-Abreu, J. P. (2005). Frost protection: Fundamentals, practice, and economics: Volume 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research, 76*(3), 267–275. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0577

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3), 426–437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s

Tarboton, D. G. (2003, 7–11 de julio). *Terrain analysis using digital elevation models in hydrology* [Ponencia]. 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, CA, Estados Unidos. https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc03/p1038.pdf

Tayyeh, H. K., & Mohammed, R. (2023). Analysis of NASA POWER reanalysis products to predict temperature and precipitation in Euphrates River basin. *Journal of Hydrology, 619*, Article 129327. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129327

Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). *Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4985en

U.S. Government Accountability Office. (2024). *Precision agriculture: Benefits and challenges for technology adoption and use* (GAO-24-105962). https://www.gao.gov/products/gao-24-105962

United Nations Convention to Combat Desertification. (2025). *Desertification and Drought Day 2025 factsheet*. UNCCD. https://www.unccd.int/resources/factsheets/desertification-and-drought-day-2025-factsheet

University of California Integrated Pest Management Program. (2014). *Models: Late blight of potato*. UC IPM. https://ipm.ucanr.edu/

Vullaganti, N., Ram, B. G., & Sun, X. (2025). Precision agriculture technologies for soil site-specific nutrient management: A comprehensive review. *Artificial Intelligence in Agriculture, 15*(2), 147–161. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2025.02.001

Wang, H., Pang, G., Yang, Q., Long, Y., Wang, L., Wang, C., Hu, S., Wang, Z., & Yang, A. (2024). Effects of slope shape on soil erosion and deposition patterns based on SfM-UAV photogrammetry. *Geoderma, 451*, Article 117076. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117076

World Meteorological Organization. (2015). *Localizing climate information services for agriculture*. WMO.

Xian, Y., Wang, T., Leng, W., Letu, H., Shi, J., Wang, G., Yan, X., & Yuan, H. (2024). Can topographic effects on solar radiation be ignored? Evidence from the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters, 51*(6), Article e2024GL108653. https://doi.org/10.1029/2024GL108653

Capítulo 3

Herramientas tecnológicas para la agricultura de precisión



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. Comprender el papel estratégico de las herramientas tecnológicas en la AP, reconociendo su función en la captura, análisis e interpretación de datos para la toma de decisiones agronómicas.

2. Diferenciar los principios de funcionamiento, alcances, ventajas y limitaciones de tecnologías como los sistemas de posicionamiento global, los drones, los sensores remotos y proximales, y las plataformas digitales de gestión agrícola.

3. Analizar cómo la integración de datos geoespaciales, climáticos, edáficos y productivos permite caracterizar la variabilidad espacial y temporal del sistema agrícola con mayor precisión.

4. Evaluar la utilidad de distintas herramientas tecnológicas para aplicaciones específicas como monitoreo del cultivo, georreferenciación, zonificación, diagnóstico temprano de estrés, manejo del riego, fertilización de tasa variable y seguimiento del rendimiento.

5. Relacionar el uso de tecnologías agrícolas con la optimización de insumos, la reducción de costos operativos, el incremento de la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental de los agroecosistemas.

6. Valorar críticamente la pertinencia de estas herramientas en diferentes contextos productivos, con especial atención a sistemas agrícolas, agroforestales y familiares de Colombia y América Latina.

7. Identificar criterios técnicos, económicos y operativos para seleccionar tecnologías apropiadas según el tamaño del predio, el cultivo, la conectividad disponible, el nivel de mecanización y la capacidad de gestión del productor.

8. Interpretar el papel de la interoperabilidad, la conectividad, la analítica de datos y la automatización como componentes clave de la transición hacia una agricultura digital más precisa, inclusiva y territorialmente adaptada.

Conceptos clave

- Herramientas tecnológicas para la AP: Conjunto de dispositivos, plataformas, sensores, sistemas de análisis y equipos digitales que permiten observar, medir, interpretar y gestionar la variabilidad del sistema agrícola con mayor exactitud.

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS/GNSS): Tecnología satelital que permite determinar la ubicación precisa de puntos, trayectorias, maquinaria y zonas de manejo dentro del predio, facilitando la georreferenciación y la ejecución de labores sitio-específicas.

- Georreferenciación: Proceso de asignar coordenadas espaciales precisas a datos, muestras, imágenes, maquinaria o eventos agronómicos, de manera que puedan analizarse y visualizarse dentro de un sistema espacial.

- Precisión diferencial y RTK: Modalidades avanzadas de posicionamiento satelital que mejoran la exactitud del GPS convencional, permitiendo operaciones agrícolas con errores mínimos de ubicación.

- Drones o UAV: Vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras o sensores que capturan información de alta resolución

- para monitoreo del cultivo, análisis del terreno, fotogrametría y detección temprana de problemas agronómicos.

- Teledetección: Obtención de información del suelo, la vegetación o el ambiente sin contacto directo, mediante sensores instalados en satélites, drones, aeronaves u otras plataformas.

- Sensores remotos: Dispositivos capaces de captar información a distancia a partir de la radiación reflejada o emitida por los objetos, ampliamente utilizados para evaluar vigor vegetal, temperatura, humedad y cobertura.

- Sensores proximales: Equipos instalados en campo o en contacto cercano con el suelo, la planta o el ambiente, que permiten medir variables como humedad, pH, conductividad eléctrica, temperatura o nutrientes.

- Cámara multiespectral: Sensor que capta información en varias bandas del espectro electromagnético, permitiendo generar índices útiles para evaluar el estado fisiológico y sanitario del cultivo.

- Imagen térmica: Registro de la temperatura superficial del cultivo o del suelo mediante sensores infrarrojos, útil para detectar estrés hídrico, anomalías fisiológicas y diferencias micro ambientales.

- Resolución espacial: Tamaño del área representada por cada píxel en una imagen, determinante para el nivel de detalle con el que puede analizarse un cultivo o un terreno.

- Resolución temporal: Frecuencia con la que un sensor, dron o satélite puede capturar información sobre una misma zona, aspecto clave para el monitoreo continuo de los agroecosistemas.

- Índice de vegetación: Relación matemática derivada de bandas espectrales utilizada para estimar vigor, biomasa, actividad fotosintética o nivel de estrés de la vegetación.

- Mapa de variabilidad: Representación espacial de diferencias intra prediales en variables del suelo, cultivo, clima o rendimiento, utilizada como base para definir zonas de manejo.

- Zona de manejo: Área relativamente homogénea dentro del predio que comparte características edáficas, topográficas, fisiológicas o productivas y que puede recibir un manejo agronómico diferenciado.

- Plataforma de gestión de datos agrícolas: Sistema digital que integra información proveniente de sensores, drones, maquinaria, estaciones meteorológicas y registros históricos para apoyar la toma de decisiones.

- Agricultura en la nube: Modelo de gestión digital en el que los datos agrícolas son almacenados, procesados y consultados mediante plataformas conectadas a internet, facilitando análisis remoto y monitoreo en tiempo real.

- Tablero de control o dashboard: Interfaz visual que organiza y presenta indicadores, mapas, alertas y análisis clave del sistema productivo para facilitar decisiones rápidas y fundamentadas.

- Sistema de soporte a la decisión (DSS): Herramienta informática diseñada para transformar datos en recomendaciones agronómicas mediante reglas, modelos, algoritmos o análisis predictivos.

- Interoperabilidad: Capacidad de distintos dispositivos, sensores, software y plataformas para intercambiar datos de manera compatible, coherente y funcional.

- Telemetría agrícola: Transmisión remota y automatizada de datos desde sensores, maquinaria o estaciones de monitoreo hacia plataformas de análisis y control.

- Internet de las Cosas (IoT): Red de dispositivos conectados que capturan, transmiten y procesan datos en tiempo real para automatizar y optimizar procesos agrícolas.

- Big data agrícola: Conjunto masivo, diverso y dinámico de datos generados por múltiples fuentes tecnológicas del sistema productivo, cuyo análisis permite identificar patrones y mejorar decisiones.

- Analítica predictiva: Uso de modelos estadísticos y computacionales para anticipar comportamientos del cultivo, riesgos fitosanitarios, necesidades hídricas o respuestas productivas futuras.

- Aplicación de tasa variable (VRT): Tecnología que permite ajustar automáticamente la dosis de semillas, fertilizantes, agua o agroquímicos según las necesidades específicas de cada zona del terreno.

- Agricultura digital: Evolución de la AP que integra conectividad, sensores, automatización, análisis de datos, inteligencia artificial y plataformas inteligentes para la gestión integral del sistema productivo.

Desarrollo técnico

Herramientas tecnológicas para la agricultura de precisión

La AP ha transformado el manejo tradicional de los sistemas productivos al incorporar información georreferenciada, monitoreo casi en tiempo real y capacidad analítica para sustentar decisiones agronómicas con mayor exactitud. Este cambio de una agricultura guiada principalmente por la experiencia hacia otra apoyada en datos ha permitido optimizar el uso de insumos, reducir pérdidas operativas, mejorar la eficiencia técnica y fortalecer la sostenibilidad de los agroecosistemas. En este marco, tecnologías como los sistemas de posicionamiento global, los drones y sensores remotos,

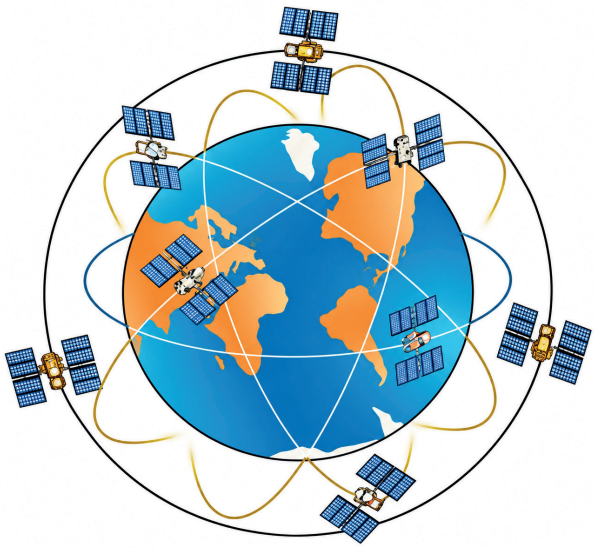
así como las plataformas digitales de gestión de datos, se han consolidado como herramientas esenciales para interpretar la variabilidad espacial y temporal del campo y traducirla en acciones de manejo más precisas (Stafford, 2000; Zhang et al., 2002; Radočaj et al., 2023).

1. Sistemas de posicionamiento global (GPS/GNSS)

Los sistemas de posicionamiento global, entendidos hoy en el marco más amplio de los sistemas globales de navegación por satélite (GPS/GNSS), constituyen la base geoespacial de la AP. Su funcionamiento se apoya en la recepción y procesamiento simultáneo de señales provenientes de constelaciones como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, lo que mejora la disponibilidad de satélites, la estabilidad de la señal y la exactitud posicional, especialmente en ambientes agrícolas con obstáculos parciales o condiciones operativas variables. Gracias a ello, el GPS/GNSS se ha convertido en una tecnología clave para el mapeo de predios, la georreferenciación de muestras, la navegación asistida de maquinaria y la ejecución de prácticas de manejo sitio-específico (Marucci et al., 2017; Radočaj et al., 2023).

Desde el punto de vista operativo, la precisión alcanzable puede ir desde escalas submétricas, cuando se emplean correcciones diferenciales, hasta escalas centimétricas cuando se utilizan sistemas RTK. Esta capacidad de posicionamiento de alta exactitud se traduce en trayectorias paralelas más consistentes, reducción de solapamientos y omisiones, mejor control en la siembra y una aplicación más uniforme y eficiente de insumos. En consecuencia, el GPS/GNSS no solo mejora la precisión espacial del trabajo agrícola, sino que también incrementa la eficiencia operativa y fortalece la integración entre maquinaria, sensores y plataformas de análisis dentro del ecosistema digital de la AP (Stafford, 2000; Valente et al., 2020) (ver figura 1).

Figura 1. *Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)*



Fuente: Esta investigación

1.1 Aplicaciones en agricultura de precisión

En la AP, el GPS tiene múltiples aplicaciones que optimizan la siembra, el riego, la fertilización y la cosecha (Miller & Clark, 2019) (ver tabla 1).

Tabla 1. *Aplicaciones del GPS y de las plataformas digitales en la AP*

Categoría	Aplicaciones principales	Aporte al manejo del sistema productivo
GPS	Control de maquinaria agrícola, mapeo del terreno, elaboración de mapas de rendimiento y seguimiento de maquinaria y equipos.	Permite georreferenciar labores, reducir solapamientos y omisiones, optimizar rutas, identificar zonas de alto y bajo rendimiento, y apoyar decisiones diferenciadas en siembra, riego, fertilización y cosecha.

Categoría	Aplicaciones principales	Aporte al manejo del sistema productivo
Plataformas digitales	Integración de datos agrícolas, dashboards interactivos, modelos predictivos de fertilización y riego, alertas personalizadas, monitoreo remoto y soporte a la toma de decisiones.	Centralizan información de suelo, clima, cultivo, maquinaria y rendimiento; facilitan la visualización de mapas, alertas y recomendaciones técnicas; y mejoran la planificación, eficiencia de insumos y respuesta ante riesgos agroclimáticos.

Fuente: Esta investigación

Ejemplos de uso

- **John Deere**: La empresa John Deere ha integrado sistemas GPS en sus máquinas agrícolas para permitir el control automático de la siembra y la fertilización. Estas tecnologías permiten la siembra a una profundidad uniforme y la aplicación de fertilizantes con alta precisión, minimizando el uso de productos químicos y mejorando los rendimientos (ver figura 2).

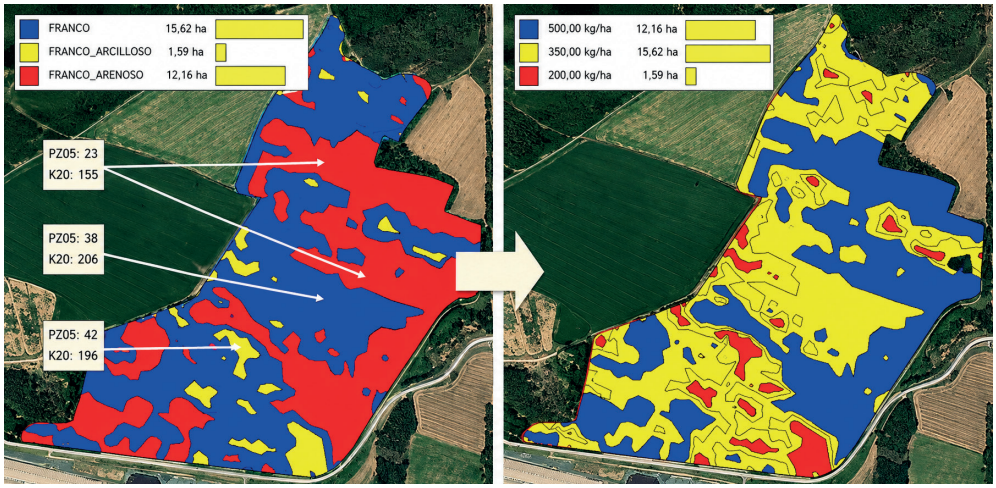
Figura 2. *Vehículo terrestre no tripulado agrícola con posicionamiento RTK*



Fuente: Modificado de XAG R150, (2024).

- **Trimble**: Trimble es una de las empresas líderes en la implementación de sistemas GPS en la agricultura. Su sistema FieldIQ permite a los agricultores controlar la aplicación de insumos de forma precisa, lo que ayuda a reducir costos y a mejorar la rentabilidad (ver figura 3).

Figura 3. *mapas de dosis variable de fósforo*



Fuente: Modificado de Variable-Rate Technology in Precision Agriculture, (2025).

2. Drones y sensores remotos

Los drones o vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han consolidado como una de las herramientas más versátiles de la AP, porque permiten capturar información del cultivo y del terreno con alta resolución espacial, flexibilidad operativa y una frecuencia de monitoreo difícil de alcanzar con plataformas satelitales convencionales. En sentido amplio, forman parte del conjunto de sensores remotos que permiten observar el sistema agrícola sin contacto directo, generando imágenes y datos útiles para interpretar la variabilidad del cultivo, anticipar problemas y orientar decisiones de

manejo más precisas, tal como plantean Mulla (2013), Maes y Steppe (2019) y Zhang, Wang, Lin, Dong y Qiang (2025).

Equipados con cámaras RGB, sensores multiespectrales, térmicos e incluso hiperespectrales, los drones permiten detectar diferencias en vigor, contenido de clorofila, estado hídrico, temperatura del dosel y patrones tempranos de estrés. Su principal fortaleza radica en que convierten la observación aérea en una fuente de información agronómica de alta resolución, útil para el monitoreo de crecimiento, la identificación de deficiencias nutricionales, la evaluación del estrés hídrico y la detección temprana de plagas y enfermedades, como muestran Maes y Steppe (2019), Dong et al. (2024), Zhang et al. (2025) y Zhu et al. (2024).

En términos operativos, los drones y sensores remotos permiten, en primer lugar, evaluar el vigor vegetal mediante índices espectrales como NDVI, GNDVI y SAVI. Estos índices han alcanzado una aplicación madura en distintos cultivos y son especialmente útiles para detectar variaciones en cobertura, actividad fotosintética, clorofila y respuesta del cultivo frente a estrés hídrico o nutricional. Además, su utilidad aumenta cuando se integran con algoritmos de análisis y aprendizaje automático, lo que mejora la capacidad de interpretación y la oportunidad de las decisiones agronómicas, según Zhang et al. (2025) y Dong et al. (2024).

En segundo lugar, estas tecnologías facilitan el monitoreo temprano de plagas y enfermedades. Los cambios en color, textura, reflectancia y temperatura del dosel pueden revelar alteraciones fisiológicas antes de que los síntomas sean evidentes en recorridos visuales de campo. Esto permite localizar focos iniciales, orientar muestreos dirigidos y diseñar intervenciones más selectivas, reduciendo aplicaciones generalizadas y mejorando la eficiencia del manejo fitosanitario, como señalan Zhu et al. (2024) al revisar el papel de los UAV, la inteligencia artificial y el aprendizaje profundo en la vigilancia de plagas y enfermedades.

En tercer lugar, los drones permiten generar ortomosaicos y modelos digitales de elevación de alta precisión mediante fotogrametría (ver figura 4), lo que amplía su utilidad más allá del diagnóstico fisiológico del cultivo. Cuando esta información se integra con datos GPS/GNSS y sistemas de información geográfica, se fortalece el análisis microtopográfico del predio, el diseño de drenajes, la delimitación de zonas con riesgo de encharcamiento y la planificación de obras de conservación de suelos y aguas. Bilodeau, Esau, Zaman, Heung y Farooque (2025) mostraron, por ejemplo, que los modelos de elevación derivados de drones fueron eficaces para identificar áreas con problemas de drenaje superficial y apoyar decisiones de mantenimiento en campos agrícolas.

En el contexto colombiano, Bonnaire Rivera, Montoya Bonilla y Obando-Vidal (2021) demostraron la utilidad del procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el NDVI en plantaciones de café variedad Castillo, evidenciando que estas herramientas no son exclusivas de sistemas altamente mecanizados, sino que también pueden adaptarse a cultivos estratégicos del país. Este tipo de experiencias confirma que los drones, cuando se articulan con análisis agronómico y lectura territorial, pueden convertirse en instrumentos valiosos para fortalecer el diagnóstico, el monitoreo y la toma de decisiones en sistemas productivos latinoamericanos.

En conjunto, los drones y sensores remotos no deben entenderse solo como tecnologías de observación aérea, sino como plataformas de generación de evidencia espacialmente explícita. Su verdadero valor en la AP reside en la posibilidad de transformar imágenes en información agronómica útil, y esa información en decisiones más oportunas, diferenciadas y sostenibles, como lo han señalado Mulla (2013) y Maes y Steppe (2019).

Un caso emblemático es el de **Agrosavia Sede Palmira**, donde drones multiespectrales identificaron deficiencias de nitrógeno en caña de azúcar, ajustando la dosis por microlote y elevando el rendimiento en 4 ton/ha (ver figura 4).

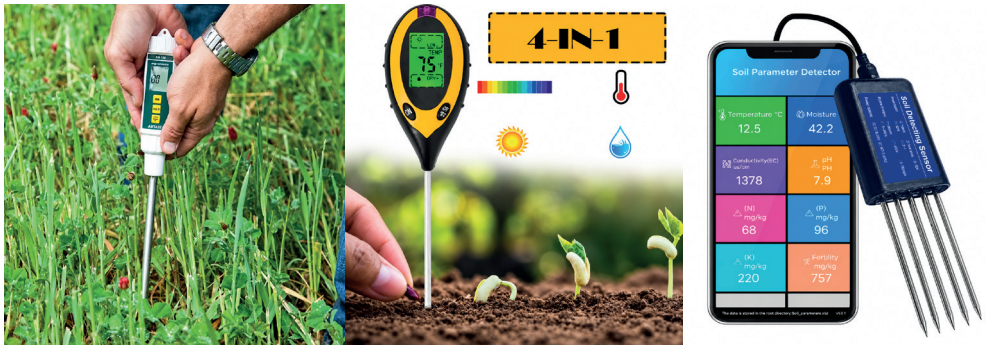
Figura 4. *Dron Mavic 2 pro*



Fuente: Esta investigación

Los sensores remotos son dispositivos que recogen información desde una distancia sin contacto directo con el objeto de estudio. En la agricultura, los sensores remotos se utilizan para monitorear diversas variables, como la humedad del suelo, la temperatura, la radiación solar, y el contenido de nutrientes en las plantas (Silva & Castro, 2017) (ver figura 5).

Figura 5. *Sensores utilizados en la agricultura: Humedad, pH, conductividad, K, N, P, brillo solar.*



Fuente: Modificado de Soil sensors for precision agricultura, (2025).

2.1 Aplicaciones de drones y sensores en agricultura de precisión

Los drones y sensores remotos se están utilizando cada vez más en la AP debido a su capacidad para capturar grandes volúmenes de datos de forma rápida y precisa. Entre sus aplicaciones más destacadas se incluyen: (Ver tabla 2)

Tabla 2. *Aplicaciones de los drones y sensores remotos en la AP.*

Categoría	Aplicación	Descripción	Aporte al manejo del sistema productivo
Drones y sensores remotos	Monitoreo de cultivos	Los drones equipados con cámaras multiespectrales o infrarrojas permiten obtener imágenes de alta resolución para evaluar el estado de los cultivos. Estas imágenes facilitan la identificación de problemas no visibles a simple vista, como deficiencias nutricionales, estrés hídrico, enfermedades o presencia temprana de plagas (ver figura 6).	Mejora el diagnóstico oportuno del cultivo y permite intervenir de manera más rápida y precisa.
Drones y sensores remotos	Detección de áreas problemáticas	A partir de las imágenes capturadas por drones, es posible identificar zonas con baja productividad o con comportamiento diferencial dentro del lote.	Permite aplicar tratamientos de manera localizada, reducir costos y mejorar la eficiencia en el uso de insumos.
Drones y sensores remotos	Monitoreo de recursos hídricos	Los sensores remotos permiten estimar condiciones relacionadas con la humedad del suelo y el estado hídrico del cultivo a escala de campo. Esta información facilita ajustar el riego según las necesidades específicas de cada zona.	Favorece un uso más eficiente del agua, evita el riego excesivo y mejora la gestión hídrica del sistema productivo.

Fuente: Esta investigación

Figura *6. Dron Monitoreando cultivos*



Fuente: Esta investigación

Ejemplos de uso

- **Parrot Anafi USA**: Este dron cuenta con una cámara multiespectral que permite a los agricultores analizar la salud de los cultivos y detectar anomalías en tiempo real. Además, su sistema de control automático facilita la creación de mapas de salud de los cultivos, lo que ayuda en la toma de decisiones para aplicar insumos de forma eficiente (ver figura 7).

Figura 7. *Dron* **Parrot Anafi USA (Elice)**



Fuente: Modificado de Parrot. (2023).

- **SenseFly eBee X**: SenseFly ofrece una serie de drones para la captura de imágenes aéreas de alta precisión, que se utilizan en agricultura para crear mapas detallados de los cultivos. El eBee X, por ejemplo, permite realizar vuelos de hasta 90 minutos, cubriendo grandes extensiones de tierra en poco tiempo, lo que optimiza el monitoreo y la recolección de datos (ver figura 8).

Figura 8. Dron SenseFly eBee X (ala fija)



Fuente: Modificado de senseFly. (2004).

3. Plataformas de gestión de datos

Las plataformas de gestión de datos agrodigitales constituyen la capa integradora de la AP, porque articulan la captura, la organización, el almacenamiento, el procesamiento y la visualización de información procedente de múltiples fuentes del sistema productivo. En estas plataformas convergen datos generados por sensores instalados en campo, estaciones meteorológicas automáticas, imágenes de drones y satélites, telemetría de maquinaria, registros históricos y observaciones del manejo agronómico. Sin embargo, su valor no reside únicamente en acumular información, sino en transformarla en conocimiento operativo que permita interpretar la variabilidad del agroecosistema y sustentar decisiones más precisas, oportunas y verificables. Wolfert, Ge, Verdouw y Bogaardt (2017) sostienen que el impacto del big data en la agricultura inteligente depende de la existencia de infraestructuras y marcos de gobernanza capaces de convertir grandes volúmenes de datos en capacidad real de decisión, mientras que Sáiz-Rubio y Rovira-Más (2020) muestran que la gestión eficiente de datos es el puente entre la adquisición en campo y las aplicaciones agronómicas sitio-específicas.

Desde el punto de vista tecnológico, estas plataformas se apoyan en arquitecturas de computación en la nube y sistemas distribuidos que permiten procesar grandes volúmenes de información con mayor escalabilidad, rapidez e interoperabilidad. Además, en escenarios rurales donde la conectividad es limitada o intermitente, han cobrado relevancia enfoques complementarios como edge computing y fog computing, que acercan parte del procesamiento al lugar donde se generan los datos y reducen la latencia de respuesta. Debauche, Mahmoudi, Manneback y Lebeau (2022) explican que la agricultura 4.0 requiere arquitecturas capaces de recolectar, almacenar y procesar información masiva en tiempos muy cortos, mientras que Benos, Tagarakis, Dolias, Berruto, Kateris y Bochtis (2021) documentan que los métodos de aprendizaje automático ya se aplican ampliamente en agricultura para predicción de rendimiento, manejo hídrico, clasificación de suelos, reconocimiento de patrones y apoyo al diagnóstico fitosanitario.

Sobre esta base, las plataformas modernas incorporan sistemas de apoyo a la decisión, tableros de control, mapas interactivos y módulos de analítica predictiva que integran variables edáficas, climáticas, topográficas, fisiológicas y operativas en una misma interfaz. Esta capacidad de síntesis permite pasar de datos dispersos a recomendaciones accionables para fertilización, riego, monitoreo de riesgos y planificación de labores. Gutiérrez, Htun, Schlenz, Kasimati y Verbert (2019) destacan que las visualizaciones y dashboards son hoy componentes centrales de muchos sistemas de apoyo a la decisión en agricultura, porque ayudan a interpretar información compleja y a reducir la incertidumbre en el proceso de análisis. Más recientemente, el desarrollo de gemelos digitales amplía esta lógica, al posibilitar representaciones virtuales del sistema agrícola que integran datos en tiempo real, simulación y análisis prospectivo para optimizar el manejo del cultivo y anticipar escenarios de respuesta. En este sentido, Tagarakis, Benos, Kyriakarakos, Pearson, Sørensen y Bochtis (2024) señalan que los gemelos digitales representan una de las fronteras más prometedoras para conectar el mundo físico y el digital en la AP (ver tabla 3).

Tabla 3. *Flujo operativo ampliado en plataformas de gestión y análisis de datos para AP*

Etapa	Proceso	Descripción técnica	Resultado esperado
1	Captura sensórica multiescala	Dispositivos IoT registran, cada cinco minutos, variables como humedad volumétrica y temperatura del suelo; drones de ala fija obtienen ortomosaicos multiespectrales con 5 cm de resolución; y satélites Sentinel-2 aportan series temporales quincenales.	Generación continua de datos edáficos, espectrales y espaciales a diferentes escalas de observación.
2	Ingesta y normalización	Los datos viajan cifrados hacia un lago de datos en la nube, donde se ejecutan procesos ETL para corregir valores atípicos, sincronizar escalas temporales y georreferenciar cada píxel o punto de muestreo.	Integración, depuración y estandarización de datos listos para análisis avanzado.

Etapa	Proceso	Descripción técnica	Resultado esperado
3	Modelado y analítica	Algoritmos de gradient boosting, redes LSTM y técnicas de geoestadística avanzada detectan patrones de estrés hídrico, correlacionan variables como pH y conductividad eléctrica, y pronostican eventos fitosanitarios como la roya del café con varios días de anticipación.	Identificación de patrones, generación de predicciones y soporte técnico para decisiones agronómicas más precisas.
4	Visualización y alertas	Tableros interactivos accesibles desde aplicaciones móviles de bajo consumo muestran mapas de calor, curvas de tendencia y recomendaciones de manejo diferenciadas por sublote, además de enviar notificaciones automáticas ante umbrales críticos.	Visualización operativa de la información y activación de alertas oportunas para el manejo del sistema productivo.

Fuente: Esta investigación

El resultado es la identificación temprana de correlaciones invisibles al ojo humano, una reducción de la incertidumbre agronómica y la posibilidad de ejecutar intervenciones quirúrgicas en vez de prácticas uniformes. De esta forma, la plataforma no solo potencia la eficiencia productiva, sino que fortalece la soberanía de datos de los productores y contribuye al desarrollo de territorios rurales inteligentes visión alineada con la agricultura colombiana del futuro (Martínez & García, 2018).

4. Aplicaciones en la agricultura de precisión

Las plataformas de gestión de datos agro digitales se han consolidado como el núcleo operativo de una AP contextualizada, porque permiten integrar información de campo, reducir incertidumbre y convertir datos heterogéneos en decisiones agronómicas oportunas. Su utilidad no se limita al almacenamiento de registros, sino que se extiende a la optimización del uso de agua, energía e insumos, al seguimiento continuo del cultivo y al fortalecimiento de la rentabilidad dentro de esquemas de sostenibilidad

ambiental y gestión inteligente del riesgo, como señalan Kumar et al. (2024) y Bayar et al. (2025).

Monitoreo en tiempo real. Mediante redes de sensores IoT, estaciones meteorológicas automáticas (ver figura 9) y drones multiespectrales, estas plataformas registran de forma continua variables críticas como humedad volumétrica del suelo, temperatura foliar, conductividad eléctrica, déficit de presión de vapor y radiación fotosintéticamente activa. Esa telemetría se integra en tableros inteligentes que visualizan tendencias, generan alertas tempranas y activan recomendaciones cuando las mediciones superan umbrales definidos para riego, nutrición o sanidad. En sistemas de riego inteligente basados en monitoreo en tiempo real ya se han reportado reducciones del uso de agua cercanas al 30 %, junto con menor consumo energético y una gestión más estable de la humedad del suelo, lo que confirma su valor operativo para una agricultura más eficiente y resiliente, según Gupta et al. (2025) y Bayar et al. (2025).

Figura 9. *Monitoreo en tiempo real mediante estación meteorológica*



Fuente: Modificado de Orbia, (2020).

Análisis predictivo para la toma de decisiones. Mediante modelos de aprendizaje automático como random forest, redes LSTM y algoritmos de gradient boosting, las plataformas reconocen patrones históricos que relacionan estrés hídrico, desbalances nutricionales, temperatura, lluvia y respuesta del cultivo, convirtiendo series de datos complejas en recomendaciones agronómicas más oportunas. En maíz, por ejemplo, ya se han desarrollado sistemas de pronóstico para Spodoptera frugiperda con horizonte semanal, apoyados en variables climáticas, registros de campo y técnicas de aprendizaje automático, lo que permite anticipar el riesgo, priorizar el monitoreo y ajustar con mayor precisión las estrategias de manejo integrado antes de que el daño se generalice en el lote, como muestran Kalisetti et al. (2025) y Dzurume et al. (2025) (ver tabla 4 y figura 10).

Figura 10. *Diagrama simplificado de un pipeline de machine learning que procesa datos climáticos y de cultivo para generar predicciones.*



Fuente: Esta investigación

Tabla 4. *Aplicaciones estratégicas de las plataformas digitales en la AP*

Aplicación	Base tecnológica	Función operativa	Beneficios principales	Ejemplo o resultado reportado
Optimización de insumos	Variabilidad espacial capturada por drones y satélites mediante NDVI, EVI e índice de clorofila	Generación de mapas de prescripción para fertilización, enmiendas calcáreas y riego sectorizado	Disminuye la sobre-aplicación de agroquímicos, reduce costos operativos y minimiza la huella ambiental	En predios arroceros del Tolima, la fertilización variable basada en mapas de rendimiento incrementó la eficiencia del nitrógeno de 28 % a 35 %, con un retorno sobre la inversión de 1,6:1
Gestión de la salud de los cultivos	Fusión de imágenes multiespectrales e infrarrojas con algoritmos de detección de anomalías	Identificación de micro zonas de estrés no visibles al ojo humano y delimitación precisa de focos de enfermedad o deficiencia nutricional	Permite aplicaciones fitosanitarias dirigidas y tratamientos foliares de precisión, reduciendo el uso de pesticidas y fortaleciendo la agroecología de precisión	Se reporta una reducción en el uso de pesticidas de hasta 22 %
Evaluación y optimización del rendimiento	Series históricas de rendimiento georreferenciado y análisis comparativo entre lotes, campañas y prácticas de manejo	Construcción de tablas de benchmarking interno para identificar combinaciones más eficientes de variedad, densidad y nutrición	Facilita la replicación de estrategias de mayor desempeño y mejora la productividad del sistema	En 36 fincas de café en Risaralda, estas comparativas incrementaron los rendimientos promedio de 0,9 a 1,4 t ha^{-1} en un horizonte de tres zafras

Aplicación	Base tecnológica	Función operativa	Beneficios principales	Ejemplo o resultado reportado
Gestión del riesgo y la sostenibilidad	Integración de pronósticos meteorológicos de alta resolución, índices de vegetación y balances hídricos	Cálculo de índices de vulnerabilidad climática asociados a helada, golpe de calor y aridez	Orienta la adopción de coberturas vivas, riegos estratégicos y ajustes fenológicos; además, reduce emisiones y aporta a los ODS 2, 12 y 13	En la sabana de Bogotá, este sistema evitó pérdidas por heladas tardías equivalentes al 8 % de la producción hortícola invernal

Fuente: Esta investigación.

Ejemplos de plataformas de gestión de datos en agricultura de precisión

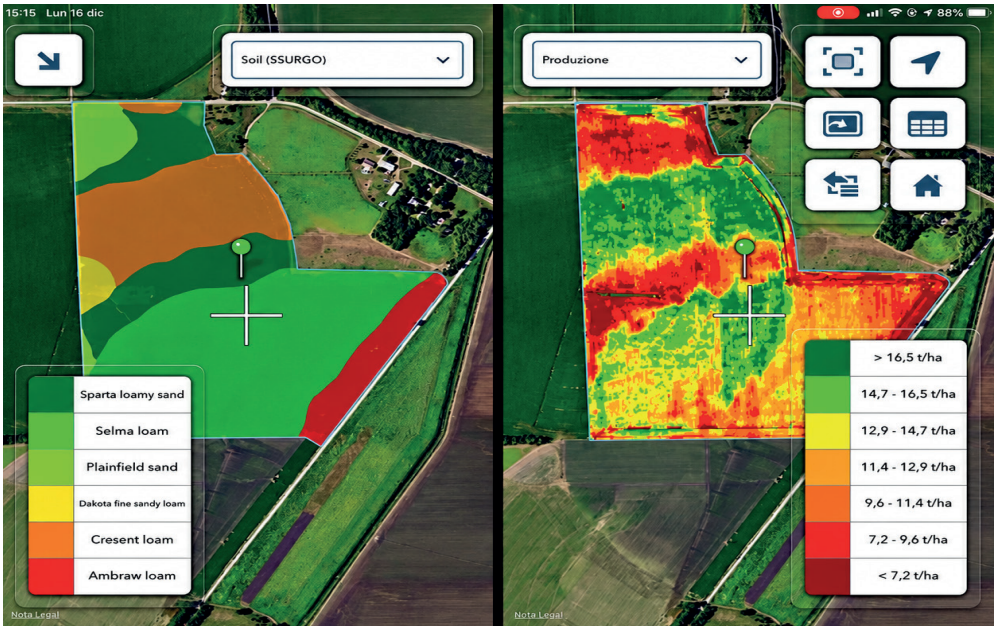
Climate FieldView constituye un ejemplo representativo de plataforma digital aplicada a la AP, porque integra en una sola interfaz el registro, almacenamiento y análisis de información generada en el predio. Climate LLC (2024) la define como una solución integral de agricultura digital orientada a ayudar al productor a tomar decisiones basadas en datos, mientras que Bayer Cono Sur (2022) destaca que la plataforma conecta información procedente de sembradoras, pulverizadoras y cosechadoras, facilitando una lectura más completa del comportamiento del lote y del desempeño de las operaciones agrícolas.

Desde el punto de vista operativo, Climate LLC (2024) señala que FieldView permite monitorear el progreso del cultivo en tiempo real, consultar actualizaciones meteorológicas, visualizar imágenes detalladas para scouting y generar alertas, marcas y análisis por ambiente. En la misma línea, Bayer Cono Sur (2022) indica que estas herramientas ayudan a optimizar el uso de insumos, obtener datos en tiempo real y generar reportes para apoyar decisiones agronómicas más precisas. De este modo, la plataforma no se limita a mostrar información, sino que organiza distintos

flujos de datos para orientar el manejo del cultivo con mayor oportunidad y menor incertidumbre.

En términos estratégicos, Climate FieldView funciona como un historial agronómico digital del predio, porque permite revisar campañas anteriores, comparar prácticas y analizar resultados a partir de registros acumulados. Según Climate LLC, su propósito es ayudar al agricultor a comprender qué funcionó, qué no funcionó y cómo mejorar la operación, mientras que Bayer Cono Sur (2022) resalta que el registro de actividades también puede apoyar la evaluación de prácticas sustentables y del impacto ambiental. En consecuencia, esta plataforma fortalece la planificación técnica, la evaluación retrospectiva del manejo y la construcción de decisiones más sustentadas dentro de la agricultura digital (ver figura 11).

Figura 11. *Plataforma Climate FieldView para la gestión de cultivos*



Fuente: Modificado de Climate Corporation, (2025).

John Deere Operations Center representa uno de los entornos más robustos de integración agro digital dentro de la AP, porque articula maquinaria, datos agronómicos y gestión operativa en una misma plataforma. John Deere (2025) describe el Operations Center como un sistema orientado a observar lo que ocurre en la operación en tiempo real, aprender del desempeño a lo largo del tiempo y convertir los planes en acciones ajustables según cambian las condiciones del campo. En este sentido, más que una herramienta de monitoreo aislada, funciona como un ecosistema conectado que reúne información de equipos, labores y resultados para sustentar decisiones más precisas.

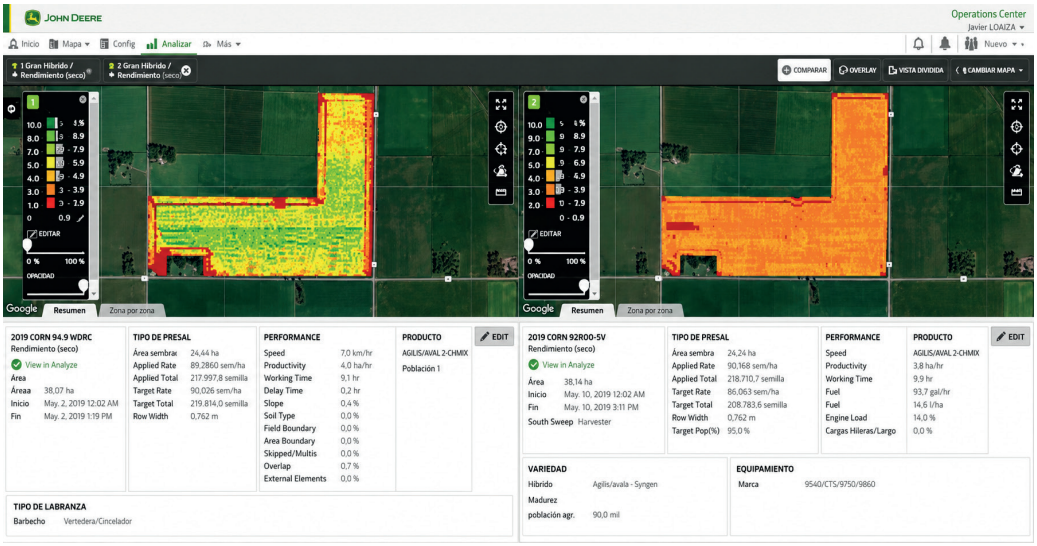
Desde el punto de vista operativo, la plataforma permite visualizar y gestionar el desempeño de la maquinaria y de las labores agronómicas mediante la recopilación de datos de campo y de máquina. John Deere (2025) señala que el sistema permite analizar métricas de desempeño, revisar rendimientos por lote, comparar resultados entre campañas y generar reportes detallados para el registro técnico. A ello se suma la conectividad JDLink, que hace posible que los datos de máquina y de campo fluyan automáticamente hacia la plataforma, mejorando la visibilidad de las operaciones y facilitando el seguimiento del trabajo en curso, como explica John Deere (2025).

Otro aspecto clave es su capacidad para fortalecer la toma de decisiones colaborativa. John Deere (2025) indica que el Operations Center permite compartir reportes y datos con asesores, clientes y aliados, mientras que John Deere (2025) precisa que los usuarios pueden establecer relaciones de compartición con concesionarios, agrónomos, aseguradores u otros socios, manteniendo control sobre qué información comparten y con quién la comparten. Esta lógica de trabajo colaborativo mejora la trazabilidad, facilita el soporte técnico remoto, reduce tiempos improductivos y ayuda a optimizar la logística de las máquinas y de las labores del predio.

En términos estratégicos, el valor de la plataforma aumenta a medida que se acumulan datos históricos de siembra, aplicación,

cosecha, mantenimiento y rendimiento. John Deere (2025) destaca que esa información permite revisar resultados, evaluar necesidades futuras de equipos, comparar variedades y descubrir nuevas eficiencias para la siguiente campaña, mientras que Deere & Company (2025) sostiene que el Operations Center se ha convertido en un componente fundacional para el almacenamiento integrado de datos operativos, agronómicos y económicos. Así, la plataforma no solo mejora el desempeño inmediato de la maquinaria, sino que transforma los registros del campo en conocimiento estratégico para una producción más rentable, trazable y adaptativa (ver figura 12).

Figura 12. *Plataforma John Deere Operations Center para la gestión de cultivos*



Fuente: Modificado de John Deere (2025)

Ag Leader AgFiniti: constituye una plataforma de agricultura digital orientada a centralizar la información operativa y agronómica de la explotación en un entorno de gestión conectado. De acuerdo con Ag Leader (2025), la plataforma permite mapear, reportar y analizar la información del predio en un solo lugar y desde distintos dispositivos, mientras que Ag Leader Community (2025) señala que AgFiniti Mobile ofrece visualización

de mapas, resúmenes detallados y herramientas de análisis para apoyar la interpretación de la información generada en campo. En ese sentido, la plataforma no actúa solo como repositorio de datos, sino como una interfaz de integración para convertir registros dispersos en decisiones más informadas.

Desde el punto de vista agronómico, AgFiniti facilita el análisis de información asociada al rendimiento, la variabilidad espacial del lote y la trazabilidad de las operaciones realizadas. Ag Leader Community (2025) indica que la plataforma permite visualizar datos cartografiables mediante filtros por lote, año u operación, mientras que Ag Leader Community (2025) documenta la existencia de reportes comparativos basados en información georreferenciada, como análisis de rendimiento por híbrido. Esta capacidad de organizar y comparar capas de información favorece la identificación de patrones productivos y el ajuste de prácticas correctivas según las condiciones específicas de cada sector del campo.

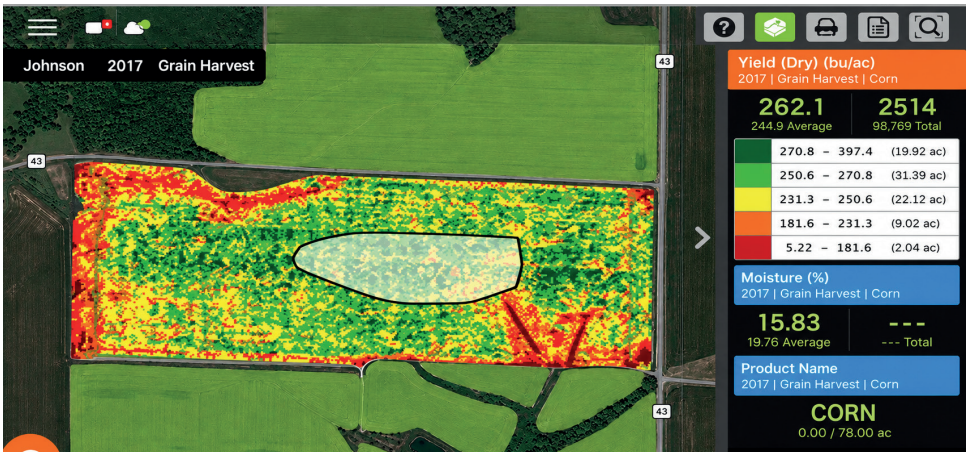
Una de las fortalezas más relevantes de AgFiniti es su capacidad de sincronizar y movilizar datos entre pantallas, dispositivos móviles y la nube. Según Ag Leader Community (2025), la plataforma mantiene sincronizados mapas y archivos entre AgFiniti Cloud y la aplicación móvil, garantizando consistencia y movilidad de la información, mientras que Ag Leader Community (2025) precisa que los usuarios pueden acceder a los datos vía internet desde distintas ubicaciones y visualizar mapas y archivos de forma inmediata. A ello se suma que AgFiniti Mobile dispone de visualización de mapas con capacidad offline, lo que amplía su utilidad operativa en contextos rurales con conectividad limitada, como reporta Ag Leader Community (2025).

Además, la plataforma fortalece la gestión colaborativa del predio, ya que permite compartir información con otros actores vinculados al proceso productivo. Ag Leader Community (2025) explica que los datos pueden compartirse para facilitar la toma de decisiones, y Ag Leader Community (2025) señala que AgFiniti permite mover información entre usuarios,

pantallas y dispositivos dentro del ecosistema digital del predio. Esta lógica de intercambio mejora la coordinación entre productor, asesor y operador de maquinaria, al tiempo que favorece la trazabilidad de las labores y una gestión más articulada de las operaciones agrícolas.

En conjunto, Ag Leader AgFiniti representa un componente importante dentro del ecosistema tecnológico de la AP, porque integra análisis espacial, sincronización de datos, consulta móvil y compartición de información en una misma arquitectura digital. Al permitir revisar mapas, comparar resultados, acceder a históricos y mantener la información disponible incluso fuera de línea, la plataforma fortalece principios clave como el monitoreo inteligente, la gestión adaptativa y el uso más eficiente de recursos, en coherencia con una agricultura más resiliente y basada en evidencia (Ag Leader, 2025) (ver figura 13).

Figura 13. *Plataforma Ag Leader AgFiniti para la gestión de cultivos*



Fuente: Modificado de Ag Leader Technology, (2025)

FarmLogs: plataforma que después de su adquisición por Bushel en 2021 pasó a integrarse al entorno digital de la compañía y fue rebautizada como Bushel Farm en 2023, puede entenderse como una solución web y móvil orientada a centralizar la gestión operativa y financiera de la

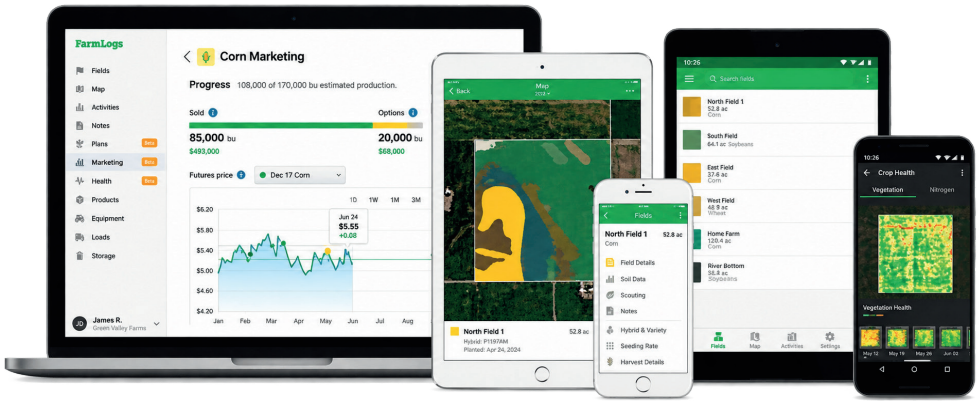
explotación. Según Bushel (2023), esta transición buscó ampliar el valor del software de gestión agrícola, manteniendo la base funcional de FarmLogs y llevándola hacia una integración más amplia con otras herramientas del ecosistema agro digital. Actualmente, la plataforma reúne funciones como field mapping, scouting, soil maps, seguimiento de lluvias, historial térmico, registro de insumos y consulta de precios, lo que fortalece el control técnico del predio y la organización de la información agronómica.

Una de sus fortalezas radica en la capacidad de registrar y relacionar actividades, insumos, equipos y resultados económicos dentro de una misma arquitectura digital. Bushel Farm Essentials incorpora seguimiento de actividades, almacenamiento, cargas, imágenes satelitales, reportes de campo y reportes de actividades, mientras que Bushel Farm Enterprise añade cálculo de profit and loss, conexiones con datos de máquina, costos de tierra y órdenes de trabajo, permitiendo que el productor analice con mayor detalle qué ocurre en cada lote y cómo se comportan los costos y retornos por unidad de superficie. Esta lógica de integración mejora la trazabilidad del uso de fertilizantes, semillas y otras labores, y facilita una lectura más precisa de la eficiencia técnica y económica de la finca.

La plataforma también incorpora variables climáticas y registros históricos que apoyan la planificación operativa del cultivo. Bushel Farm ofrece funciones como recent rainfall, rain and heat history y monthly rainfall report, con las que el agricultor puede comparar el comportamiento reciente del tiempo con temporadas anteriores y ajustar decisiones diarias de manejo. Además, la automatización de entrada de datos desde la red Bushel y la integración con John Deere Operations Center y Climate FieldView reducen trabajo manual, mejoran la consistencia de los registros y facilitan el cruce entre actividades de campo, contratos, costos e información de máquina. En este sentido, más que una simple base de datos, la plataforma opera como un sistema de soporte para decisiones productivas, financieras y logísticas sustentadas en evidencia.

En conjunto, FarmLogs, hoy Bushel Farm, se posiciona como una herramienta relevante dentro del ecosistema de la AP porque articula monitoreo, registros de campo, conectividad entre plataformas y análisis económico en una sola interfaz. Su aporte principal no está solo en digitalizar información, sino en hacerla más útil para el agricultor moderno, al permitir una gestión más integrada, más trazable y más adaptable frente a los retos de eficiencia, rentabilidad y resiliencia que enfrenta la producción agrícola contemporánea (ver figura 14).

Figura 14. *Plataforma FarmLogs para la gestión de cultivos*



Fuente: Modificado de Bushel Farm, (2024)

La incursión de las herramientas tecnológicas en la agricultura, tal como se detalla en este capítulo, representa un punto de inflexión fundamental hacia una producción agrícola más eficiente y sostenible. este capítulo subraya acertadamente cómo los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), los drones y sensores remotos, y las plataformas de gestión de datos no son meros complementos, sino pilares transformadores que redefinen las prácticas tradicionales, pasando de un enfoque generalizado a uno de intervención localizada y optimizada.

Avances tecnológicos y su impacto potencial

La evolución de los sistemas de posicionamiento global ha transformado de manera profunda los fundamentos operativos de la mecanización agrícola contemporánea. La georreferenciación centimétrica alcanzada mediante receptores RTK, combinada con sistemas de guiado automático, control de trayectorias y mapas de prescripción, ha permitido ejecutar labores como la siembra, la fertilización y la cosecha con niveles de precisión que hace apenas unas décadas eran difíciles de imaginar. En el plano práctico, esta exactitud reduce superposiciones, minimiza omisiones, optimiza recorridos y mejora la distribución espacial de semillas e insumos, con efectos directos sobre la eficiencia técnica, el consumo de combustible y la calidad de la labor. John Deere indica que AutoTrac permite reducir el número de pasadas y mejorar la gestión del tránsito de la maquinaria, mientras que PTx Trimble destaca que Field-IQ ayuda a evitar solapamientos y a controlar con mayor precisión la dosificación y la aplicación de insumos en campo. En conjunto, estas tecnologías muestran que la AP ya no depende únicamente de la observación del operario, sino de sistemas integrados que convierten la ubicación geográfica en un parámetro agronómico de alta relevancia para la productividad y la sostenibilidad.

De manera paralela, la incorporación de drones de ala fija y multirrotor equipados con cámaras multiespectrales, térmicas e infrarrojas ha ampliado de forma notable la capacidad de observación del agricultor moderno. Estos vehículos aéreos no tripulados permiten cubrir superficies extensas y generar orto mosaicos de alta resolución, índices de vegetación y mapas térmicos con un nivel de detalle suficiente para detectar focos tempranos de estrés hídrico, deficiencias nutricionales, alteraciones fisiológicas y patrones iniciales de enfermedades o plagas. La revisión de Zhang, Wang, Lin, Dong y Qiang destaca precisamente que la teledetección multiespectral con UAV se ha consolidado en AP por su utilidad en monitoreo del crecimiento, diagnóstico nutricional, detección de plagas y enfermedades y predicción del rendimiento. En esa misma línea, la revisión de Mulla muestra que la percepción remota se ha convertido en un componente estratégico para

analizar la variabilidad espacial del predio y orientar intervenciones más específicas. Esta capacidad de anticipación representa un cambio sustancial, porque permite pasar de tratamientos uniformes e indiscriminados a intervenciones selectivas en microzonas del lote, con menores costos, mejor focalización y una reducción importante del impacto ambiental sobre agua, suelo y biodiversidad asociada.

Por su parte, las plataformas de gestión de datos constituyen el núcleo estratégico de la agricultura digital, ya que integran información procedente de sensores de suelo, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, drones, telemetría de maquinaria y registros de manejo, y la convierten en tableros, alertas y recomendaciones de manejo en tiempo real. Su importancia no radica solo en almacenar grandes volúmenes de datos, sino en procesarlos, interpretarlos y relacionarlos mediante analítica avanzada, aprendizaje automático y visualización inteligente. Wolfert, Ge, Verdouw y Bogaardt explican que el big data en smart farming va mucho más allá de la producción primaria y exige infraestructuras capaces de traducir datos complejos en capacidad real de decisión. En consecuencia, herramientas como Climate FieldView, John Deere Operations Center, Ag Leader AgFiniti o Bushel Farm no deben entenderse simplemente como programas de registro, sino como plataformas que organizan información heterogénea para detectar tendencias, comparar campañas, apoyar decisiones de riego, fertilización y protección del cultivo, y fortalecer la trazabilidad de cada labor realizada. Así, el dato deja de ser un registro aislado y se convierte en un insumo estratégico para la gestión productiva, económica y ambiental del predio.

En síntesis, la convergencia entre sistemas GPS/GNSS de alta precisión, drones de observación avanzada y plataformas de análisis de datos está impulsando el tránsito desde una agricultura correctiva, basada en respuestas posteriores al problema, hacia una agricultura predictiva y prescriptiva, capaz de anticipar escenarios y ajustar decisiones antes de que las pérdidas ocurran. Este cambio tecnológico no solo incrementa la eficiencia operativa y la rentabilidad del productor, sino que favorece una

gestión más racional del agua, la energía, los fertilizantes y los fitosanitarios, en coherencia con metas más amplias de sostenibilidad, resiliencia climática y reducción de emisiones. En otras palabras, la AP ya no se limita a incorporar equipos sofisticados al campo; representa una nueva forma de gestionar los sistemas productivos, donde la información espacial, temporal y operativa se convierte en la base para producir mejor, con menor impacto y con mayor capacidad de adaptación frente a la incertidumbre climática y los desafíos del futuro agroalimentario.

Síntesis final

Este capítulo pone en evidencia que las herramientas tecnológicas no deben entenderse como accesorios aislados dentro de la AP, sino como componentes articulados de un sistema de gestión basado en datos, georreferenciación, monitoreo continuo y análisis oportuno del territorio. A lo largo del capítulo se mostró que tecnologías como los sistemas de posicionamiento global, los drones, los sensores remotos y las plataformas digitales de gestión no solo amplían la capacidad de observación del productor, sino que transforman la forma de interpretar la variabilidad espacial y temporal del agroecosistema. En este sentido, el capítulo deja claro que la innovación tecnológica no tiene como fin acumular dispositivos, sino mejorar la calidad de las decisiones agronómicas, hacer más eficiente el uso de los insumos y fortalecer la sostenibilidad del sistema productivo.

Uno de los aportes centrales del capítulo fue demostrar que cada herramienta cumple una función específica dentro de una lógica de integración. El GPS y los sistemas GPS/GNSS aportan precisión espacial y permiten georreferenciar labores, maquinaria, muestreos y mapas de rendimiento; los drones y sensores remotos amplían la capacidad de diagnóstico mediante imágenes y lecturas de alta resolución; y las plataformas de gestión de datos convierten flujos heterogéneos de información en tableros, alertas, modelos predictivos y recomendaciones accionables. De esta forma, el capítulo no presentó estas tecnologías como soluciones independientes, sino como una arquitectura tecnológica

complementaria que permite pasar del monitoreo descriptivo a una agricultura cada vez más predictiva y prescriptiva, donde observar, analizar, anticipar y actuar forman parte de un mismo proceso técnico de manejo.

El desarrollo temático también permitió evidenciar que el verdadero valor de estas herramientas no está solo en su sofisticación técnica, sino en su capacidad para mejorar procesos concretos del sistema productivo. A través del GPS se optimiza la siembra, la fertilización y la operación de maquinaria; mediante drones y sensores se detectan con mayor anticipación problemas de estrés hídrico, deficiencias nutricionales y focos fitosanitarios; y con las plataformas digitales se integran variables climáticas, edáficas, fisiológicas y operativas para orientar decisiones sobre riego, uso de insumos, monitoreo del rendimiento y gestión del riesgo. En consecuencia, el capítulo mostró que la AP avanza cuando la tecnología logra traducirse en intervenciones más localizadas, más eficientes y ambientalmente más responsables, reduciendo pérdidas, mejorando la trazabilidad y fortaleciendo la capacidad adaptativa del productor frente a escenarios de incertidumbre climática y productiva.

Sin embargo, el capítulo también subrayó que la adopción de estas tecnologías no ocurre de manera automática ni homogénea. La brecha digital, los altos costos iniciales, la conectividad limitada, la necesidad de alfabetización tecnológica, la interoperabilidad entre plataformas y la gobernanza de los datos siguen siendo desafíos estructurales que condicionan su expansión, especialmente en territorios rurales de América Latina. Por ello, una de las conclusiones más relevantes del capítulo es que el futuro de la AP depende no solo del desarrollo técnico de nuevas herramientas, sino de la construcción de condiciones habilitantes para su uso equitativo, pertinente y territorialmente adaptado. En esa dirección, la tecnología solo alcanza su verdadero potencial cuando se articula con formación, políticas públicas, modelos de acceso inclusivos y una visión ética del manejo de la información y de los recursos naturales.

En síntesis, el capítulo 3 mostró que la AP se sostiene sobre una base tecnológica que amplía la capacidad humana de observar, interpretar y decidir sobre el territorio agrícola con mayor exactitud. Pero también dejó claro que la precisión no depende únicamente de la calidad del dispositivo, sino de la capacidad de integrar información, comprender su significado agronómico y traducirla en acciones de manejo coherentes con las realidades ecológicas, económicas y sociales del campo. Así, las herramientas tecnológicas estudiadas en este capítulo no solo representan innovación operativa, sino la posibilidad de construir una agricultura más inteligente, más eficiente, más resiliente y, sobre todo, más consciente de que producir mejor implica también conocer mejor el territorio que se cultiva.

Ejercicios prácticos y de discusión

Objetivo: Fomentar el análisis crítico, la aplicación de conceptos y la discusión sobre los desafíos y oportunidades de la AP en diferentes contextos.

Ejercicio 1: Estudio de Caso y Análisis de Viabilidad Económica y Social

Descripción: Elijan una de las tres tecnologías principales discutidas en el capítulo (GPS, Drones/Sensores Remotos o Plataformas de Gestión de Datos). Imaginen que son consultores agrónomos encargados de implementar esta tecnología en un contexto específico.

Tarea:

1. **Selección del Contexto:** Elijan uno de los siguientes escenarios para la implementación:

- Una pequeña cooperativa de productores de café en Nariño, Colombia.

- Una mediana empresa familiar dedicada al cultivo de arroz en el Valle del Cauca, Colombia.

- Una gran explotación agrícola de cereales en la sabana africana (con recursos limitados).

2. **Análisis de Necesidades:** Describan las necesidades y desafíos agrícolas específicos de este contexto que la tecnología elegida podría resolver.

3. Evaluación de Viabilidad:

- Investiguen costos aproximados de adquisición y mantenimiento de la tecnología elegida para ese contexto (pueden ser rangos estimados).

- Identifiquen los beneficios esperados en términos de productividad, reducción de costos o sostenibilidad.

- Discutan los principales obstáculos económicos y sociales para la implementación de esta tecnología en el escenario elegido (ej. acceso a crédito, capacitación, conectividad, resistencia al cambio, tamaño de la explotación).

Propuesta de Solución: Propongan al menos dos estrategias concretas para superar los obstáculos identificados y hacer la implementación más viable.

Ejercicio 2: Debate Crítico sobre la Sostenibilidad y la Brecha Tecnológica

Descripción: El capítulo menciona la contribución de la AP a la sostenibilidad. Sin embargo, existen debates sobre si estas tecnologías son inherentemente sostenibles para todos o si profundizan la brecha tecnológica.

Tarea:

División de Roles: La clase se dividirá en dos grupos para un debate:

- Grupo A (Pro-AP Sostenible): Argumentarán que las herramientas tecnológicas de precisión son fundamentales e intrínsecamente sostenibles, con potencial para ser adoptadas globalmente si se abordan los desafíos adecuados. Deberán presentar ejemplos concretos de cómo estas tecnologías reducen el impacto ambiental y mejoran la eficiencia de los recursos.

- Grupo B (Críticos de la AP y Brecha Tecnológica): Argumentarán que, si bien la tecnología tiene potencial, su implementación actual y las dinámicas del mercado tienden a exacerbar las desigualdades existentes y plantean nuevos desafíos en términos de sostenibilidad holística (ej. huella de carbono de la producción tecnológica, dependencia de empresas, privacidad de datos). Deberán proponer alternativas o enfoques más equitativos.

Preparación: Cada grupo deberá investigar y preparar argumentos sólidos, respaldados por ejemplos o datos, si es posible.

Debate: Se realizará un debate moderado, con tiempo para presentación de argumentos, refutación y una conclusión final por parte de cada grupo.

Ejercicio 3: Diseño de un proyecto de AP (caso práctico)

Descripción: Un inversionista agrícola desea implementar un sistema integral de AP en una finca de 50 hectáreas dedicada al cultivo de aguacate Hass en una zona rural de Antioquia, Colombia, donde la conectividad es “aceptable” pero no “excelente”. Se espera que el proyecto aborde la optimización del riego, la detección temprana de enfermedades y el monitoreo del rendimiento.

Tarea:

1. **Definición de Componentes:** Proponer una combinación específica de las tres tecnologías principales del capítulo (GPS, Drones/ Sensores Remotos, Plataformas de Gestión de Datos) que mejor se adapte a los objetivos del inversionista y al contexto dado. Justifiquen sus elecciones.

2. **Especificación de Funcionamiento:** Describan brevemente cómo cada componente elegido interactuaría con los otros para lograr los objetivos (ej. ¿qué tipo de sensor usarán?, ¿cómo los datos del dron alimentarán la plataforma?, ¿qué uso se le dará al GPS?).

3. **Identificación de Desafíos Específicos:** Señalen al menos tres desafíos técnicos o logísticos específicos que podrían surgir en este proyecto (ej. integración de datos de diferentes proveedores, calibración de sensores, resistencia de los trabajadores, mantenimiento de equipos).

4. **Medidas de Mitigación:** Para cada desafío identificado, propongan una medida concreta para mitigarlo.

Ejercicio 4: Análisis de riesgos y ética en plataformas de gestión de datos

Descripción: Las plataformas de gestión de datos son el cerebro de la AP, pero también concentran una gran cantidad de información sensible.

Tarea:

1. **Riesgos de Seguridad y Privacidad:** Identifiquen y describan al menos tres riesgos importantes relacionados con la seguridad de los datos (ej. ciberataques, pérdida de datos) y la privacidad de la información del agricultor en estas plataformas.

2. **Dilemas Éticos:** Discutan al menos dos dilemas éticos que podrían surgir del uso de estas plataformas (ej. ¿Quién es el dueño de los datos generados? ¿Pueden las empresas utilizar los datos de los agricultores para su propio beneficio comercial sin su consentimiento? ¿Existe el riesgo de dependencia tecnológica excesiva?).

3. **Propuestas Regulatorias/Contractuales:** Sugieran dos tipos de cláusulas contractuales o principios regulatorios que podrían ayudar a proteger a los agricultores frente a estos riesgos y dilemas éticos. Consideren el contexto colombiano o latinoamericano si es relevante.

Ejercicio 5: La AP en la agenda de desarrollo rural

Descripción: Imaginen que son parte de un equipo de formulación de políticas para el Ministerio de Agricultura de Colombia. Deben crear un plan estratégico para promover la AP a nivel nacional.

Tarea:

1. **Prioridades Nacionales:** Identifiquen las tres principales áreas (ej. seguridad alimentaria, reducción de pobreza rural, exportaciones, sostenibilidad ambiental) donde la AP podría tener un mayor impacto en Colombia. Justifiquen sus elecciones.

2. **Incentivos y Programas:** Propongan al menos tres tipos de incentivos o programas que el gobierno podría implementar para fomentar la adopción de estas tecnologías por parte de los agricultores colombianos (ej. subsidios, créditos blandos, centros de demostración, alianzas público-privadas, programas de investigación y desarrollo).

3. **Roles de Actores Clave:** Describan brevemente el rol que deberían jugar los siguientes actores en esta estrategia:

- Universidades e institutos de investigación
- Empresas tecnológicas
- Asociaciones de agricultores
- Entidades financieras

4. **Visión a 20 Años:** ¿Cómo ven la agricultura colombiana con un uso generalizado de la AP en los próximos 20 años? ¿Qué desafíos persistirían?

Referencias

Ag Leader Community. (2025). AgFiniti® app descriptions. https://portal.agleader.com/community/s/article/agfiniti-apps-description

Bayar, J., Ali, N., Cao, Z., Ren, Y., & Dong, Y. (2025). Artificial intelligence of things (AIoT) for precision agriculture: Applications in smart irrigation, nutrient and disease management. Smart Agricultural Technology, 12, Article 101629. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101629

Bayer Cono Sur. (2022, 21 de octubre). FieldView®. https://www.conosur.bayer.com/es/fieldview

Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. Sensors, 21(11), Article 3758. https://doi.org/10.3390/s21113758

Bilodeau, M. F., Esau, T. J., Zaman, Q. U., Heung, B., & Farooque, A. A. (2025). Using drones to predict degradation of surface drainage on agricultural fields: A case study of the Atlantic Dykelands. AgriEngineering, 7(4), Article 112. https://doi.org/10.3390/agriengineering7040112

Bonnaire Rivera, L., Montoya Bonilla, B. y Obando-Vidal, F. (2021). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 22(1), e1578. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578

Bushel. (2021). Bushel Farm: Farm management & financial software. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://www.bushelpowered.com/farmers

Bushel. (2023, March 2). FarmLogs is now Bushel Farm. https://www.bushelpowered.com/blog/farmlogs-is-now-bushel-farm

Climate LLC. (2024). Maximize results with our digital farming solution. Climate FieldView. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://climate.com/en-us.html

Climate LLC. (2025). Field-level data to analyze every acre, seed and practice. Climate FieldView. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://climate.com/en-us/solutions/analyze-data.html

Debauche, O., Mahmoudi, S., Manneback, P., & Lebeau, F. (2022). Cloud and distributed architectures for data management in agriculture 4.0: Review and future trends. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 34(9), 7494–7514. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.015

Deere & Company. (2025). 2024 business impact report. https://www.deere.com/assets/pdfs/common/our-company/sustainability/business-impact-report-2024.pdf

Dong, H., Dong, J., Sun, S., Bai, T., Zhao, D., Yin, Y., Shen, X., Wang, Y., Zhang, Z., & Wang, Y. (2024). Crop water stress detection based on UAV remote sensing systems. Agricultural Water Management, 303, Article 109059. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109059

Dzurume, T., Darvishzadeh, R., Dube, T., Babu, T. S. A., Billah, M., Alam, S. N., Kamal, M., Harun-Or-Rashid, M., Biswas, B. C., Uddin, M. A., Muyeed, M. A., Shah, M. M. R., Krupnik, T. J., & Nelson, A. (2025). Detection of fall armyworm infestation in maize fields during vegetative growth stages using temporal Sentinel-2. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 139, Article 104516. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104516

El Vuelo del Drone. (2024). XAG R150: robot agrícola autónomo para pulverización. https://elvuelodeldrone.com/drones-profesionales/drones-xag/xag-r150/

EOS Data Analytics. (2025). Soil sensors for precision agriculture [Imagen]. https://eos.com/products/crop-monitoring/vra-maps/

Gupta, S., Chowdhury, S., Govindaraj, R., Amesho, K. T. T., Shangdiar, S., Kadhila, T., & Iikela, S. (2025). Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency. Smart Agricultural Technology, 12, Article 101081. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101081

Gutiérrez, F., Htun, N. N., Schlenz, F., Kasimati, A., & Verbert, K. (2019). A review of visualisations in agricultural decision support systems: An HCI perspective. Computers and Electronics in Agriculture, 163, Article 104844. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.053

John Deere. (2025). Features: Operations Center. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/operations-center/features/

Jouanjean, M.-A., Casalini, F., Wiseman, L., & Gray, E. (2020). Issues around data governance in the digital transformation of agriculture: The farmers' perspective (OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers No. 146). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/53ecf2ab-en

Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. Smart Agricultural Technology, 8, Article 100487. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487

Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. Trends in Plant Science, 24(2), 152–164. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007

Martínez, S., & García, P. (2018). Big Data y su aplicación en la agricultura de precisión. Publicaciones Agrarias.

Marucci, A., Monarca, D., Colantoni, A., Cappuccini, A., Cecchini, M., Mosconi, M., Bedini, R., & Menghi, R. (2017). Precision farming in hilly areas: The use of network RTK in GPS/GNSS technology. Agriculture, 7(7), Article 60. https://doi.org/10.3390/agriculture7070060

McFadden, J., Casalini, F., & Antón, J. (2022). Policies to bolster trust in agricultural digitalisation: Issues note (OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers No. 175). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/5a89a749-en

Miller, R., & Clark, L. (2019). Precision agriculture: A comprehensive guide. CRC Press.

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Orbia. (2020). Estação meteorológica “Cultivo Inteligente”: AgroSmart [Fotografía de producto]. https://www.orbia.ag/produto/50251/RA0001/estacao-meterologica-cultivo-inteligente-agrosmart

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). The digital transformation of the agriculture and food system (No. 2019/01). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/7a94280c-en

Parrot. (2023). ANAFI USA [Fotografía de producto]. https://www.parrot.com/en/drones/anafi-usa

PTx Trimble. (2025). Field-IQ crop input control system. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://www.ptxag.com/us/en/products/brand/ptx-trimble/flow-application-control/field-iq-crop-input-control-system.html

Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global navigation satellite systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the Web of Science. Agriculture, 13(7), Article 1417. https://doi.org/10.3390/agriculture13071417

Sáiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. Agronomy, 10(2), Article 207. https://doi.org/10.3390/agronomy10020207

senseFly. (2025). eBee X mapping drone. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://www.sensefly.com/drones/ebee-x/

Silva, E., & Castro, R. (2017). Aplicaciones de sensores remotos en la gestión agrícola. Centro de Estudios Agrarios. Kalisetti, V. S., Sudharshanam, U., Mallela Venkata, N. K., Mandla, R., Akula, S., Bedika, M., Dharavath, B., Dogga, S., A, R. B., & Javaji, C. (2025). “Smart agriculture: A climate-driven approach to modelling and forecasting fall armyworm populations in maize using machine learning algorithms”. Frontiers in Plant Science, 16, Article 1636412. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1636412

Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. Journal of Agricultural Engineering Research, 76(3), 267–275. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0577

Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2024). Digital twins in agriculture and forestry: A review. Sensors, 24(10), Article 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117

The Climate Corporation. (2025). Climate FieldView™ [Aplicación móvil]. App Store. https://apps.apple.com/us/app/climate-fieldview/id797902820

Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4985en

Trimble. (2025). Real-time kinematic (RTK). Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://www.trimble.com/en/solutions/technologies/rtk-real-time-kinematic

U.S. Government Accountability Office. (2024). Precision agriculture: Benefits and challenges for technology adoption and use (GAO-24-105962). https://www.gao.gov/products/gao-24-105962

Valente, D. S. M., Momin, A., Grift, T., & Hansen, A. (2020). Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems. Computers and Electronics in Agriculture, 168, Article 105142. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105142

Variable-Rate Technology in Precision Agriculture. (2025). Prescription map for variable-rate fertilizer application [Imagen]. Precision Agriculture Technologies. https://www.precision-agriculture-technologies.com/precision_agriculture/variable_rate_technology_precision_agriculture/variable_rate_application_methods.htm

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming: A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2–3), 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

Zhang, S., Wang, X., Lin, H., Dong, Y., & Qiang, Z. (2025). A review of the application of UAV multispectral remote sensing technology in precision agriculture. Smart Agricultural Technology, 12, Article 101406. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101406

Zhu, H., Lin, C., Liu, G., Wang, D., Qin, S., Li, A., Xu, J.-L., & He, Y. (2024). Intelligent agriculture: Deep learning in UAV-based remote sensing imagery for crop diseases and pests detection. Frontiers in Plant Science, 15, Article 1435016. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1435016Ratur sunti coritio nsequossi offictur? Qui velit officto iurio ea iuribusandae expliquid evelibus di dentias eic tentiam faciet ommodis iur, et lam, est qui repudandi il mostrunt.

Capítulo 4

Muestreo Georreferenciado del Suelo



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

- Comprender los fundamentos técnicos, espaciales y agronómicos del muestreo georreferenciado del suelo como base para la AP.
- Reconocer la importancia de la variabilidad espacial del suelo y su influencia sobre la fertilidad, la disponibilidad de agua, la respuesta del cultivo y la toma de decisiones sitio-específicas.
- Diferenciar los principales tipos de muestreo de suelo, incluyendo muestreo aleatorio, sistemático, estratificado, por cuadrícula y por zonas de manejo, valorando sus ventajas y limitaciones según el contexto productivo.
- Diseñar esquemas de muestreo georreferenciado acordes con el tamaño del predio, la heterogeneidad del terreno, el cultivo, la topografía y los objetivos del análisis.
- Aplicar criterios técnicos para la selección de puntos de muestreo, profundidad, densidad de muestreo, frecuencia de recolección y georreferenciación de muestras.
- Integrar herramientas como GPS/ GNSS, SIG, sensores proximales, cartografía digital y plataformas de análisis espacial en la planificación y ejecución del muestreo del suelo.
- Interpretar la información obtenida a partir del muestreo georreferenciado para construir mapas temáticos de fertilidad, acidez, salinidad, materia orgánica, humedad y otras propiedades relevantes del suelo.
- Relacionar los resultados del muestreo georreferenciado con decisiones agronómicas sobre fertilización variable, corrección

de suelos, manejo del riego, conservación del suelo y delimitación de zonas homogéneas de manejo.

- Valorar el muestreo georreferenciado como una herramienta estratégica para mejorar la eficiencia en el uso de insumos, reducir costos, disminuir impactos ambientales y fortalecer la sostenibilidad del sistema productivo.

- Analizar las limitaciones operativas, económicas y metodológicas del muestreo georreferenciado del suelo en contextos agrícolas, agroforestales y familiares de Colombia y América Latina.

Conceptos clave

- Muestreo georreferenciado del suelo: Procedimiento de recolección de muestras de suelo cuya ubicación queda registrada con coordenadas precisas, permitiendo analizar la distribución espacial de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

- Georreferenciación: Proceso mediante el cual cada punto de muestreo se ubica espacialmente por medio de coordenadas geográficas o proyectadas, haciendo posible su representación cartográfica y análisis espacial.

- Variabilidad espacial del suelo: Diferencias que ocurren dentro de un mismo predio en atributos como textura, pH, materia orgánica, humedad, conductividad eléctrica, fertilidad o compactación.

- Punto de muestreo: Lugar específico del terreno donde se extrae una muestra de suelo para su análisis, definido según un diseño técnico y registrado con coordenadas.

- Profundidad de muestreo: Espesor del perfil del suelo del cual se extrae la muestra, determinado según el cultivo, el objetivo del análisis y la dinámica de raíces, nutrientes o humedad.

- Muestra simple: Porción individual de suelo recolectada en un punto específico del terreno.
- Muestra compuesta: Mezcla homogénea de varias submuestras tomadas dentro de una misma unidad de muestreo, utilizada para representar de forma más integrada una zona del predio.
- Submuestra: Fracción individual de suelo tomada en distintos puntos cercanos y posteriormente integrada en una muestra compuesta.
- Densidad de muestreo: Número de puntos o muestras recolectadas por unidad de superficie, que determina el nivel de detalle espacial del diagnóstico.
- Diseño de muestreo: Estrategia metodológica utilizada para distribuir espacialmente los puntos de muestreo en el terreno, de acuerdo con criterios estadísticos, agronómicos y espaciales.
- Muestreo aleatorio: Diseño en el que los puntos de recolección se seleccionan sin un patrón espacial fijo, útil en terrenos relativamente homogéneos.
- Muestreo sistemático: Diseño en el que los puntos de muestreo se distribuyen siguiendo una malla regular o patrón previamente definido.
- Muestreo por cuadrícula: Estrategia de muestreo sistemático que divide el terreno en celdas o cuadrantes regulares para captar la variabilidad espacial con mayor detalle.
- Muestreo estratificado: Método en el cual el terreno se divide previamente en unidades relativamente homogéneas y luego se toman muestras dentro de cada una de ellas.

- Muestreo por zonas de manejo: Diseño basado en unidades delimitadas según atributos del suelo, relieve, rendimiento, cobertura o comportamiento agronómico del predio.

- Zona homogénea de muestreo: Área del terreno con características relativamente similares en suelo, topografía, manejo o productividad, dentro de la cual puede tomarse una muestra representativa.

- GPS/ GNSS: Sistema de posicionamiento satelital utilizado para registrar con precisión la ubicación de los puntos de muestreo.

- SIG: Sistemas de Información Geográfica que permiten almacenar, superponer, analizar y visualizar los puntos de muestreo y los resultados del análisis de suelo en formato espacial.

- Cartografía de suelos: Representación espacial de propiedades edáficas obtenidas a partir de puntos de muestreo, interpolación y análisis geoespacial.

- Interpolación espacial: Procedimiento estadístico y geográfico que permite estimar valores de una variable del suelo en sitios no muestreados a partir de puntos conocidos.

- Kriging: Método geoestadístico de interpolación que estima la distribución espacial de una variable del suelo considerando su dependencia espacial.

- IDW: Método de interpolación por distancia inversa, utilizado para estimar valores entre puntos de muestreo a partir de la cercanía espacial.

- Mapa temático de suelo: Representación cartográfica de una propiedad específica del suelo, como pH, fósforo, potasio, materia orgánica, conductividad eléctrica o humedad.

- Conductividad eléctrica aparente: Variable utilizada para identificar patrones espaciales asociados con textura, humedad, salinidad y contenido de arcilla o materia orgánica.

- Fertilidad espacial: Distribución heterogénea de nutrientes y condiciones químicas dentro del predio, que puede ser representada mediante mapas georreferenciados.

- Agricultura específica por sitio: Enfoque de manejo que ajusta decisiones agronómicas según las condiciones particulares de cada zona del terreno.

- Aplicación variable de insumos: Uso diferenciado de fertilizantes, correctivos, agua u otros insumos con base en la información espacial obtenida mediante muestreo y análisis del suelo.

- Diagnóstico edáfico espacial: Interpretación integrada de los resultados del análisis de suelo considerando su distribución geográfica dentro del predio.

- Resolución espacial del muestreo: Nivel de detalle con el que el muestreo permite representar la variabilidad del suelo en el terreno.

- Error de muestreo: Diferencia entre el valor real del suelo y el valor estimado a partir de las muestras recolectadas, influida por el diseño, la densidad y la representatividad del muestreo.

- Calidad de la muestra: Condición en la que la muestra de suelo conserva representatividad, integridad y confiabilidad para el análisis posterior.

- Trazabilidad de muestreo: Registro organizado del proceso de toma de muestras, incluyendo ubicación, profundidad, fecha, responsable y condiciones de campo.

- Manejo sitio-específico del suelo: Conjunto de decisiones agronómicas ajustadas a la variabilidad espacial del terreno con base en información georreferenciada.

Desarrollo técnico

Muestreo georreferenciado del suelo

La AP, consolidada actualmente como uno de los principales referentes de la modernización rural en América Latina, ha transformado la manera en que los productores gestionan sus cultivos, el recurso hídrico y, de manera especial, la salud del suelo, como lo señalaron Delgado et al. (2011). Dentro de este marco tecnológico, el muestreo georreferenciado del suelo se posiciona como una práctica esencial, ya que permite evaluar con alta precisión, mediante sistemas GPS/GNSS y herramientas de análisis espacial, la variabilidad de nutrientes y de las propiedades físico-químicas a lo largo de cada lote. En otras palabras, no consiste en recolectar muestras de manera aislada, sino en construir una radiografía detallada del terreno, asignando a cada punto una coordenada exacta que posteriormente permita establecer recomendaciones de fertilización por sitio específico y estrategias de riego diferenciado, tal como lo indico FAO (2020).

Este capítulo profundiza en tres componentes fundamentales: la planificación de los puntos de muestreo, las técnicas de análisis físico-químico y la elaboración posterior de mapas de fertilidad. En concordancia con los lineamientos de la Comisión Brasileña de AP y con las orientaciones del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, cada uno de estos componentes se aborda no solo desde su fundamento conceptual, sino también desde su relevancia económica y ambiental para el contexto regional andino-amazónico, de acuerdo con lo expuesto por Ministério da Agricultura (2013) y Motsara et al., (2020).

La etapa de planificación constituye, sin exageración, la base estructural de todo el proceso. Una malla de muestreo correctamente diseñada asegura representatividad y permite captar la variabilidad espacial que tanto

interesa a productores, técnicos y extensionistas. En efecto, una muestra mal localizada puede conducir a sobredosificación de fertilizantes o, por el contrario, a decisiones de manejo insuficientes que terminan reflejándose en menores rendimientos y una mayor huella ambiental, como advirtieron Rosas-Velásquez et al. (2021). Por ello, una planificación rigurosa permite ahorrar recursos, optimizar las decisiones relacionadas con la fertirrigación y avanzar hacia metas asociadas con el uso sostenible del suelo y del agua.

1. Definición y objetivo de la planificación de puntos de muestreo

Planificar los puntos de muestreo implica determinar, con fundamento estadístico y criterio agronómico, los sitios donde serán extraídas las muestras dentro de una unidad productiva. El propósito central es representar adecuadamente la heterogeneidad edáfica, incluyendo variables como textura, pH, macro y micronutrientes, materia orgánica y densidad aparente, entre otras. Esta labor, lejos de limitarse a una actividad de escritorio, requiere integrar información histórica de rendimiento, imágenes satelitales de vegetación y el conocimiento empírico del productor sobre aquellas zonas problemáticas del lote que suelen mostrar comportamientos diferenciales, como lo señalaron Mylavarapu, R. S., & Lee, (2008).

Una adecuada planificación reduce la probabilidad de obtener datos sesgados y evita diagnósticos erróneos que pueden derivar en costos innecesarios para el productor. Asimismo, facilita la identificación de microambientes que demandan manejos diferenciados, favorece una utilización más eficiente de los insumos y contribuye a la sostenibilidad técnica, económica y ambiental del sistema productivo, tal como lo plantearon Balafoutis et al. (2017).

1.1 Factores que influyen en la selección de puntos de muestreo

Para la planificación eficiente de los puntos de muestreo, es necesario considerar diversos factores que influyen directamente en la variabilidad del suelo. Entre estos, destacan los siguientes (ver tabla 1).

Tabla 1. *Factores que influyen en la selección de puntos de muestreo del suelo*

Ítem	Factor	Descripción	Implicación para el muestreo
1	Variabilidad espacial del suelo	El suelo presenta alta heterogeneidad, por lo que propiedades como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la conductividad eléctrica pueden variar significativamente incluso en distancias cortas. En zonas de ladera, por ejemplo, las partes altas suelen presentar menores niveles de nitrógeno disponible que las zonas bajas debido a procesos de lixiviación y escorrentía.	Se deben establecer intensidades de muestreo diferenciadas para captar los gradientes espaciales y representar adecuadamente la variabilidad del terreno.
2	Historia de uso y prácticas de manejo	Las actividades realizadas en el pasado, como rotaciones, fertilización, uso de maquinaria pesada o labranza convencional, influyen en la distribución actual de la fertilidad del suelo. En algunos casos, se presentan zonas con alta concentración de nutrientes alrededor de antiguos puntos de aplicación.	Es necesario considerar el historial del lote para ubicar puntos de muestreo que reflejen las alteraciones ocasionadas por las prácticas de manejo previas.
3	Topografía del terreno	La pendiente y la posición en el relieve condicionan la distribución de nutrientes, humedad y materia orgánica. Las zonas con mayor pendiente presentan más riesgo de erosión, mientras que los fondos de valle y depresiones tienden a acumular humedad, fósforo y potasio.	La inclusión de un modelo digital de elevación (DEM) permite planificar densidades de muestreo ajustadas a cada estrato topográfico.

Ítem	Factor	Descripción	Implicación para el muestreo
4	Tamaño y forma del predio	En predios extensos pueden emplearse mallas de muestreo más amplias, mientras que en minifundios se requieren cuadrículas más densas para evitar generalizaciones inadecuadas. Además, los predios de forma irregular generan zonas de borde y rincones que requieren atención especial.	El diseño del muestreo debe adaptarse al tamaño y geometría del predio para garantizar una cobertura representativa y evitar sesgos.

Fuente: Esta Investigación

1.2 Métodos para determinar los puntos de muestreo

Una vez definidos los factores a considerar, se deben aplicar métodos para determinar las ubicaciones exactas de los puntos de muestreo. Los principales métodos incluyen (ver tabla 2).

Tabla 2. *Métodos para determinar los puntos de muestreo del suelo*

Ítem	Método	Descripción	Aplicación o implicación para el muestreo
1	Muestreo en cuadrícula regular	El terreno se divide en una malla de celdas equidistantes y la muestra se toma en el centro geométrico de cada cuadrante. Este método es útil en lotes con alta variabilidad y poca información histórica disponible. Busca dar una cobertura uniforme a todo el predio, considerando por igual colinas, medias lomas y fondos.	Permite construir una red de puntos sistemática y representativa. La densidad de la cuadrícula debe ajustarse al tamaño del predio y al presupuesto disponible.

Ítem	Método	Descripción	Aplicación o implicación para el muestreo
2	Muestreo estratificado	El lote se divide en subáreas o estratos con características similares, como textura, pendiente o uso previo, y dentro de cada una se toman las muestras. Este método reduce la variabilidad no relevante y mejora la representación de ambientes contrastantes dentro del predio.	Facilita un diagnóstico más preciso de cada ambiente y evita promediar zonas con comportamientos diferentes, lo que favorece recomendaciones de manejo más ajustadas.
3	Muestreo aleatorio	Consiste en seleccionar de manera aleatoria las coordenadas de muestreo dentro del polígono agrícola. Es un método rápido y sencillo, especialmente útil en predios pequeños o relativamente homogéneos.	Reduce el tiempo de planificación, pero puede dejar sin cubrir áreas críticas en suelos muy variables. Se recomienda cuando la variación espacial es baja.
4	Muestreo basado en zonas de interés	Se centra en áreas identificadas previamente por el productor o por registros históricos, como zonas sub productivas, áreas salinas o sectores con antecedentes de manejo intensivo. El esfuerzo de muestreo se concentra en sitios problemáticos o estratégicos.	Optimiza recursos y permite obtener información clave para intervenir áreas críticas. Es especialmente útil cuando se cuenta con experiencia de campo y antecedentes productivos.

Fuente: Esta Investigación

1.3 Tecnología en la planificación de puntos de muestreo

Los sistemas de información geográfica y las herramientas de teledetección han dejado de ser recursos exclusivos del ámbito científico para convertirse en instrumentos operativos dentro de la AP. A través de una capa SIG es posible superponer variables como topografía, conductividad eléctrica aparente, información edáfica, imágenes satelitales multitemporales y mapas históricos de rendimiento, construyendo así un mosaico espacial de variabilidad que orienta con mayor precisión la localización de los puntos de muestreo. De igual manera, el uso de drones multiespectrales,

sensores proximales y plataformas satelitales permite capturar información relacionada con vigor del cultivo, temperatura de la superficie, humedad del suelo y patrones de reflectancia, lo que fortalece la delimitación de zonas con comportamiento diferencial dentro del lote (Fraisse et al., 2001; Kitchen et al., 2003; Sishodia et al., 2020; Vallentin et al., 2020).

La incorporación de estas tecnologías en la fase de diseño del muestreo permite mejorar la eficiencia del proceso, ya que facilita la identificación previa de sectores homogéneos y de áreas con mayor contraste espacial, haciendo posible ajustar con mayor criterio la densidad de muestreo. En consecuencia, el productor puede focalizar el esfuerzo de campo, disminuir desplazamientos innecesarios, optimizar los análisis de laboratorio y destinar mejor los recursos económicos disponibles. Además, la integración de SIG, sensores de campo y teledetección permite simular distintos escenarios de muestreo antes de iniciar la toma física de muestras, favoreciendo decisiones más equilibradas entre precisión, cobertura y costo operativo (Peralta et al., 2013; Vallentin et al., 2020; Fraisse et al., 2001).

Un ejemplo aplicado puede observarse en lotes de maíz (figura 1) donde los mapas de rendimiento (figura 2)muestran diferencias persistentes entre sectores planos, áreas intermedias y zonas de ladera. En estos casos, la combinación de atributos topográficos, información de conductividad eléctrica aparente y registros históricos de productividad permite delimitar subzonas para un muestreo más representativo. Posteriormente, los análisis de fertilidad pueden revelar contrastes importantes en la disponibilidad de nutrientes y en la dinámica del agua en el suelo, información que sirve de base para formular estrategias de fertilización variable y manejo diferencial del cultivo. Este enfoque mejora la interpretación agronómica del lote y fortalece la toma de decisiones orientadas a elevar la eficiencia de los insumos y la productividad general del sistema (Bakhsh et al., 2007; Basso et al., 2007; da Silva et al., 2008).

Figura 1. *Imagen campo de maíz antes de planificación estratificada*



Fuente: Esta Investigación

Figura 2. *Conteo de plantas y análisis de población de maíz en plataforma de monitoreo agrícola*



Fuente: Modificado de DroneScope. (2024).

La planificación rigurosa de los puntos de muestreo constituye un requisito ineludible para garantizar la fidelidad y representatividad de la información derivada de un muestreo georreferenciado del suelo. Una estrategia metodológicamente sólida, sustentada en la caracterización previa de la variabilidad espacial, las prácticas históricas de manejo y la morfometría del terreno, habilita el establecimiento de redes de muestreo

que permiten a los responsables técnicos disponer de datos robustos para la modelación y la toma de decisiones agronómicas de precisión.

2. Técnicas de análisis físico-químico del suelo

El análisis físico-químico del suelo constituye una base indispensable para diagnosticar su potencial productivo, su estado de conservación y su aptitud para sostener sistemas agrícolas intensivos o de manejo conservacionista. Estas determinaciones permiten caracterizar la fracción mineral, la reacción del suelo, la dinámica de nutrientes y otros atributos que condicionan la disponibilidad de elementos esenciales para las plantas, de modo que las intervenciones agronómicas puedan ajustarse con mayor precisión a los requerimientos específicos de cada sitio. En este sentido, el análisis del suelo no solo cumple una función descriptiva, sino también operativa, al orientar decisiones relacionadas con fertilización, enmiendas, riego y manejo integral del sistema productivo (FAO, 1980; van Reeuwijk, 1998; van Reeuwijk, 2002).

2.1 Análisis de la textura del suelo

La textura del suelo, definida por la proporción relativa de arena, limo y arcilla, establece la matriz física sobre la cual se desarrollan procesos como la retención de agua, la aireación, la porosidad, la difusión gaseosa y la adsorción de nutrientes. Por ello, esta propiedad ejerce una influencia directa sobre la capacidad de intercambio catiónico, la susceptibilidad a la compactación, la resistencia mecánica frente a las labores culturales y la vulnerabilidad a procesos de erosión. En términos agronómicos, conocer la textura permite interpretar con mayor precisión el comportamiento hídrico y químico del suelo, así como su respuesta frente al manejo productivo y conservacionista (FAO, 2006; FAO, 2008; van Reeuwijk, 2002).

Desde el punto de vista metodológico, la determinación textural puede realizarse mediante procedimientos de sedimentación ampliamente aceptados, entre los cuales destacan el método de la pipeta y el método del

hidrómetro de Bouyoucos. Ambos parten del principio de separación de partículas por tamaño en suspensión, aunque difieren en la preparación de la muestra, el tratamiento de la materia orgánica y la precisión analítica alcanzada. El método de la pipeta suele considerarse más preciso, mientras que el método del hidrómetro resulta más rápido y práctico para análisis rutinarios; sin embargo, su exactitud puede mejorar cuando se realiza una adecuada destrucción de materia orgánica y una dispersión eficiente de los agregados. En consecuencia, la selección del método debe responder al objetivo del análisis, al nivel de detalle requerido y a las condiciones operativas del laboratorio (Beretta et al., 2014; van Reeuwijk, 2002).

2.1.1 Métodos de determinación

El análisis de la textura del suelo se puede realizar utilizando varios métodos; (ver tabla 3)

Tabla 3. *Métodos de determinación de la textura del suelo*

Ítem	Método	Fundamento	Aplicación o utilidad
1	Método de sedimentación de Bouyoucos	Se fundamenta en la ley de Stokes y evalúa la velocidad de sedimentación de las fracciones granulométricas en una suspensión suelo-agua.	Permite calcular con alta resolución la proporción relativa de arena, limo y arcilla en la muestra de suelo.
2	Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR)	Se basa en la captura de firmas espectrales asociadas a vibraciones moleculares de los componentes del suelo.	Ofrece un procedimiento no destructivo y rápido para estimar la composición textural, disminuyendo tiempos de laboratorio y costos analíticos.
3	Difracción de rayos X	Caracteriza la mineralogía cristalina a escala submicrométrica, especialmente en la fracción arcillosa.	Aporta información detallada sobre minerales de arcilla y fases de alteración, siendo útil en suelos con alta fracción coloidal y comportamiento expansivo.

Fuente: Esta Investigación

2.2 Análisis de la conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica del suelo es un parámetro fundamental para evaluar la concentración de sales solubles y, en consecuencia, el riesgo de salinidad, sodicidad funcional y restricciones osmóticas para el crecimiento vegetal. Su determinación permite interpretar la calidad química del medio edáfico y anticipar limitaciones en la absorción de agua y nutrientes, especialmente en sistemas intensivos, áreas bajo fertirriego y zonas con aguas de riego de calidad variable. Por ello, la CE se considera un indicador operativo de gran utilidad para el diagnóstico de la fertilidad química y del estado salino del suelo (Smith & Doran, 1996; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021a; FAO, 2020).

2.2.1 Métodos de determinación

La CE puede determinarse mediante medición en suspensión suelo:agua, empleando relaciones estandarizadas como 1:1, 1:2 o 1:5, según el protocolo analítico adoptado y el objetivo de la evaluación. Este procedimiento resulta útil en análisis rutinarios y en diagnósticos comparativos de laboratorio. De forma complementaria, la determinación en extracto de pasta saturada constituye el método de referencia para estudios de salinidad, ya que representa con mayor fidelidad la solución del suelo bajo condiciones cercanas a saturación y permite estimar la respuesta de los cultivos frente al estrés salino. Una CE elevada reduce el potencial osmótico de la solución del suelo, limita la absorción de agua por las raíces y puede inducir desbalances iónicos y toxicidades específicas, razón por la cual su monitoreo resulta indispensable en esquemas de manejo de precisión (Smith & Doran, 1996; FAO, 2021a; FAO, 2020).

2.3 Determinación del pH del suelo

El pH del suelo expresa su condición de acidez o alcalinidad y constituye una de las variables químicas más influyentes sobre la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana, la solubilidad de elementos

potencialmente tóxicos y la eficiencia de las enmiendas. Valores de pH excesivamente bajos o altos pueden restringir la absorción de nutrientes esenciales, alterar el equilibrio químico de la rizosfera y comprometer el desempeño fisiológico de los cultivos. Por esta razón, su evaluación es indispensable en programas de fertilización, encalado y manejo integral del suelo (FAO, 2021b; Smith & Doran, 1996).

2.3.1 Métodos de determinación

El método más utilizado para determinar el pH del suelo es la potenciometría directa mediante pH-metro, aplicada sobre suspensiones estandarizadas suelo:agua o suelo:solución salina, según el protocolo de laboratorio y las características del suelo analizado. En contextos donde la salinidad puede interferir con la lectura, también se emplean soluciones como $CaCl_2$ para estabilizar la medición. De manera complementaria, los métodos colorimétricos con indicadores constituyen una alternativa de campo útil para valoraciones preliminares, aunque presentan menor precisión que la lectura instrumental. En términos agronómicos, la medición confiable del pH es esencial para definir correctivos de acidez o estrategias de acidificación controlada en suelos alcalinos (FAO, 2021b; Gavlak et al., 2005; Sikora & Moore, 2014).

2.4 Análisis de materia orgánica

La materia orgánica del suelo constituye un componente central en la regulación de la fertilidad, la estabilidad estructural, la retención de agua, la capacidad tampón y la actividad biológica. Su presencia mejora la formación y estabilidad de agregados, favorece la aireación, incrementa la capacidad de intercambio catiónico en muchos suelos y fortalece la resiliencia del sistema frente a procesos de degradación. Desde una perspectiva funcional, la materia orgánica representa además una reserva estratégica de carbono y nutrientes, por lo que su cuantificación resulta clave para evaluar la calidad y salud del suelo (Walkley & Black, 1934; FAO, 2026).

2.4.1 Métodos de determinación

Entre los procedimientos más empleados para estimar la materia orgánica se encuentra el método de pérdida por ignición, el cual consiste en secar previamente la muestra y luego someterla a combustión controlada, generalmente a 550 °C, para estimar la fracción orgánica a partir de la pérdida de masa. Este método ofrece una aproximación práctica y ampliamente utilizada en laboratorios, aunque su exactitud puede verse influida por la presencia de carbonatos o por pérdidas asociadas a agua estructural en ciertos minerales. Otro procedimiento clásico es la oxidación húmeda de Walkley-Black, basada en la oxidación parcial del carbono orgánico con dicromato de potasio en medio ácido, seguida de valoración del exceso de reactivo. Esta metodología sigue siendo de gran utilidad por su bajo requerimiento instrumental, aunque exige control analítico cuidadoso y reconocimiento de sus limitaciones de recuperación. La combinación interpretativa de ambos enfoques permite distinguir entre una estimación global de materia orgánica y una aproximación a la fracción orgánica más susceptible a oxidación (Walkley & Black, 1934; FAO, 2026).

2.5 Análisis de nutrientes disponibles

La cuantificación de nutrientes disponibles en el suelo permite estimar la oferta inmediata o potencialmente accesible de elementos esenciales para las plantas, entre ellos nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y diversos micronutrientes. Su interpretación debe realizarse con base en extractantes apropiados, calibraciones regionales, cultivo de interés y condiciones edafoclimáticas específicas, dado que la disponibilidad real de nutrientes depende de procesos de adsorción, intercambio, solubilidad y dinámica biológica. En este sentido, el análisis de nutrientes constituye una herramienta clave para formular esquemas de fertilización diferenciada y mejorar la eficiencia del uso de insumos (van Reeuwijk, 2002; Sikora & Moore, 2014).

2.5.1 Métodos de determinación

La determinación de nutrientes disponibles se realiza mediante soluciones extractantes seleccionadas según el elemento a evaluar y el sistema de interpretación adoptado por cada laboratorio. Entre las más utilizadas se encuentran soluciones salinas neutras o ligeramente ácidas, así como extractantes multielementales, capaces de movilizar la fracción intercambiable o fácilmente disponible para las plantas. Una vez obtenido el extracto, la cuantificación puede efectuarse mediante espectrometría de absorción atómica, fotometría de llama, espectrofotometría o espectrometría de emisión con plasma, dependiendo del nutriente y del nivel de precisión requerido. En particular, la absorción atómica ha sido ampliamente utilizada para la determinación de Ca, Mg, K, Na y diversos micronutrientes, debido a su sensibilidad analítica y su utilidad en rutinas de laboratorio agrícola (Gavlak et al., 2005; Sikora & Moore, 2014).

En conjunto, las técnicas de análisis físico-químico del suelo son esenciales para interpretar de manera integral las condiciones edáficas y sustentar decisiones agronómicas más precisas sobre fertilización, riego, corrección de acidez o salinidad y conservación del recurso suelo. A ello se suma el avance de herramientas de diagnóstico proximal, como la espectroscopía visible e infrarroja cercana, que amplían las posibilidades de evaluación rápida y de alta resolución para múltiples propiedades del suelo, fortaleciendo la AP y el manejo sostenible de los sistemas productivos (Stenberg et al., 2010; FAO, 2022).

3. Generación de mapas de fertilidad

La generación de mapas de fertilidad constituye uno de los componentes más representativos de la AP, porque permite identificar y representar espacialmente la variabilidad de nutrientes y de otras propiedades edáficas dentro de una unidad productiva. Como explicaron McBratney, Mendonça Santos y Minasny (2003), este tipo de cartografía convierte observaciones puntuales del suelo en información espacial continua, lo que facilita la

interpretación de la heterogeneidad edáfica y sustenta decisiones de manejo más ajustadas a las condiciones reales del terreno. En términos operativos, su construcción integra la georreferenciación de las muestras, el análisis exploratorio de datos, la evaluación de la dependencia espacial, la interpolación y la validación de los resultados.

3.1 Definición de mapa de fertilidad

Desde una perspectiva técnica, un mapa de fertilidad es una representación cartográfica y georreferenciada de la distribución espacial de nutrientes disponibles y de propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH, la materia orgánica, la conductividad eléctrica y la textura. Según McBratney et al. (2003), la lógica de este tipo de mapas se apoya en el vínculo entre observaciones del suelo y covariables espaciales, con el fin de representar de manera continua las condiciones del terreno. En la práctica, estos mapas se elaboran a partir de un muestreo sistemático, en el que cada muestra queda asociada a una coordenada precisa y luego es analizada en laboratorio para transformarse en una superficie interpretable desde el punto de vista agronómico.

De esta manera, cada unidad cartográfica expresa condiciones nutricionales específicas y permite identificar zonas con deficiencias, excesos o contrastes importantes en fertilidad. Como señalaron Wollenhaupt, Wolkowski y Clayton (1994), la representación espacial de variables como fósforo y potasio hace posible reconocer patrones que no serían evidentes bajo un enfoque de manejo uniforme. Por ello, los mapas de fertilidad pueden entenderse como una radiografía funcional del suelo, útil para delimitar áreas de comportamiento diferencial dentro del lote.

3.2 Relevancia agroambiental y operativa

La importancia de los mapas de fertilidad no se limita a la visualización de datos edáficos, sino que radica en su capacidad para sustentar decisiones de manejo sitio-específico. Sawyer (1994) explicó que la filosofía de la

tecnología de tasa variable consiste precisamente en ajustar la aplicación de fertilizantes a la variabilidad espacial del terreno, evitando decisiones homogéneas sobre superficies heterogéneas. Bajo esta lógica, los mapas de fertilidad se convierten en la base técnica para definir dosis diferenciadas y mejorar la eficiencia en el uso de insumos.

Desde el punto de vista económico, esta estrategia contribuye a optimizar costos, ya que dirige los fertilizantes hacia las zonas donde realmente se necesitan. En términos ambientales, reduce el riesgo de sobreaplicación, lixiviación y acumulación de nutrientes en sectores vulnerables. A nivel productivo, favorece una nutrición más ajustada a la demanda del cultivo y, por tanto, mejora la probabilidad de obtener rendimientos más estables dentro del lote. En esa misma línea, Wollenhaupt et al. (1994) demostraron que el mapeo espacial de nutrientes constituye un soporte clave para la aplicación variable de fertilizantes en AP.

3.3 Métodos para la generación de mapas de fertilidad

La elaboración de mapas de fertilidad se basa en métodos de interpolación espacial que permiten estimar los valores de una propiedad del suelo en ubicaciones donde no se tomaron muestras directas. Goovaerts (1999) destacó que la geoestadística ofrece un marco especialmente útil para el análisis de propiedades del suelo, porque incorpora explícitamente la estructura de dependencia espacial entre observaciones. Además del kriging, en estudios aplicados también se emplean métodos determinísticos como la interpolación por inverso de la distancia (IDW), así como variantes más complejas como el cokriging o modelos híbridos. Fu, Gao y Liu (2021) mostraron que la selección del método de interpolación influye directamente en la calidad predictiva de los mapas y debe responder a la estructura de los datos, la densidad de muestreo y la naturaleza de la variable analizada.

3.3.1 Kriging

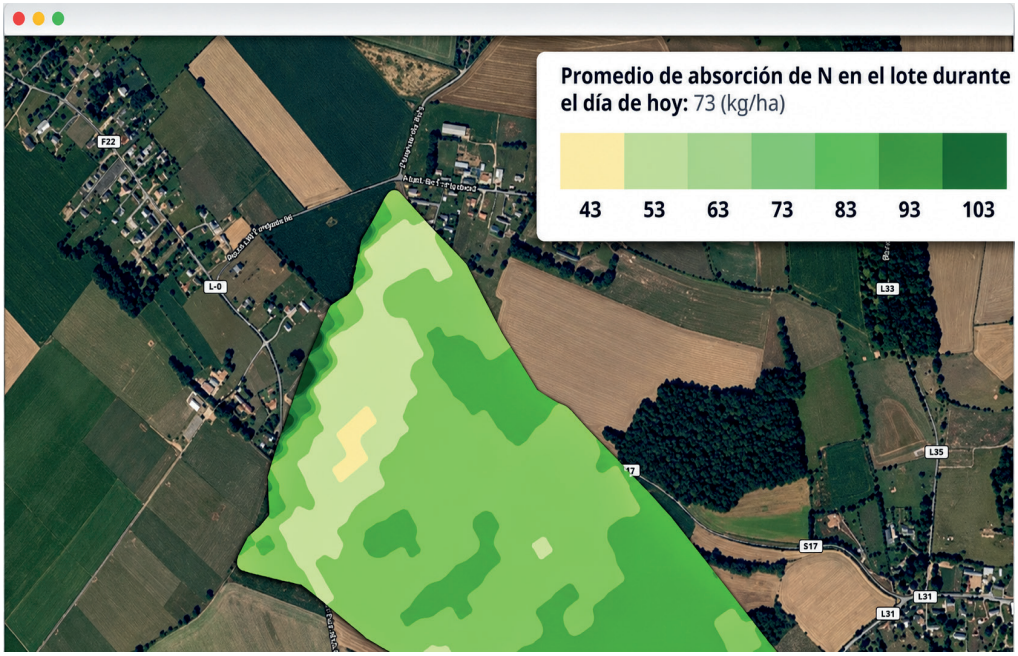
El kriging representa una de las aproximaciones geoestadísticas más robustas para la elaboración de mapas de fertilidad. Su fundamento

teórico se apoya en la autocorrelación espacial, es decir, en la idea de que las observaciones cercanas tienden a ser más semejantes que aquellas ubicadas a mayor distancia. De acuerdo con Journel y Huijbregts (1978), y posteriormente con Goovaerts (1999), este método utiliza el semivariograma para describir la estructura de variación espacial y, con base en ella, estimar valores en sitios no muestreados minimizando la varianza de predicción.

Entre sus principales ventajas se encuentra la capacidad de generar superficies continuas con sustento estadístico y de ofrecer una estimación explícita de la incertidumbre asociada a cada predicción. Esta característica es especialmente valiosa en AP, porque permite identificar áreas donde convendría intensificar el muestreo en campañas posteriores. Como expuso Goovaerts (1999), el valor del kriging no reside únicamente en interpolar, sino también en cuantificar la confiabilidad espacial de cada estimación.

En aplicaciones agrícolas, el kriging ha sido ampliamente utilizado para modelar la distribución espacial de nutrientes y sustentar decisiones de fertilización diferencial. Por ejemplo, en lotes destinados a maíz o a otros cultivos extensivos, la cartografía derivada de este método permite identificar sectores con menor disponibilidad de nutrientes y, a partir de ello, definir prescripciones más precisas para la fertilización. En coherencia con lo planteado por Sawyer (1994) y por Wollenhaupt et al. (1994), este tipo de información transforma el mapa de fertilidad en una herramienta de decisión, más que en una simple representación gráfica del suelo (ver figura 3).

Figura 3. *mapeo de distribución y adsorción de nitrógeno en el suelo.*



Fuente: Agrositio. (2022)

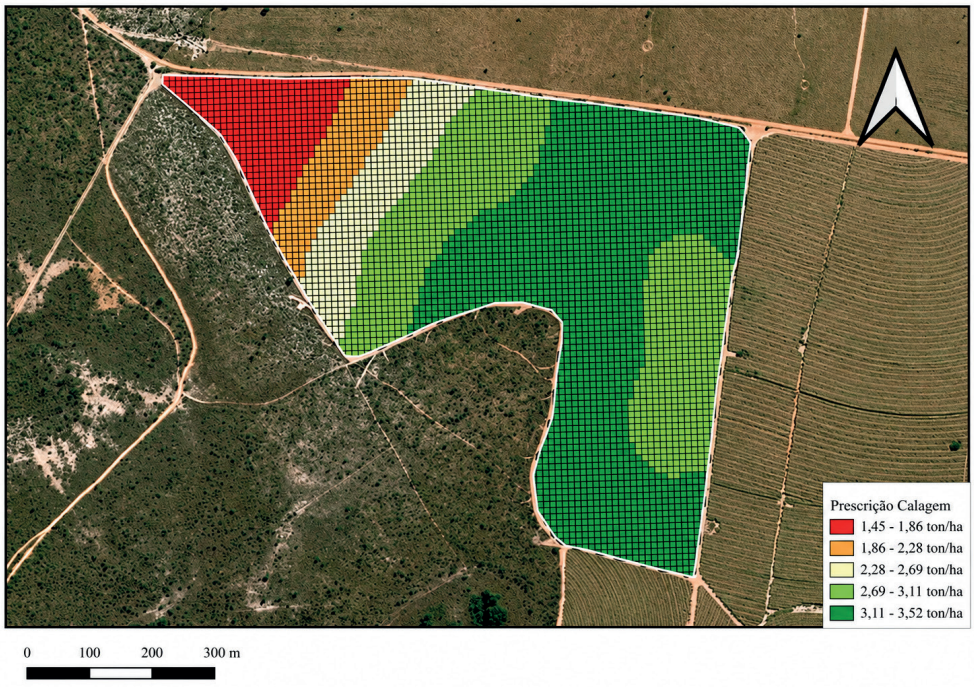
3.3.2 Interpolación por inverso de la distancia (IDW)

El método IDW calcula el valor de un punto desconocido como la media ponderada de las mediciones circundantes, asignando mayor influencia a las muestras más próximas. Su implementación es conceptualmente sencilla y computacionalmente eficiente, lo que le otorga gran popularidad en entornos operativos donde se dispone de software SIG estándar y se requiere una solución rápida. Sin embargo, al no considerar la estructura de correlación espacial explícita, puede presentar limitaciones para describir patrones complejos de variabilidad edáfica.

Situación de uso recomendada: fincas con densidad de muestreo intermedia, donde la heterogeneidad no alcance escalas muy pequeñas y los

gradientes de nutrientes sean relativamente suaves. Bajo estas condiciones, IDW provee resultados satisfactorios con un esfuerzo computacional reducido (ver figura 4).

Figura 4. *mapa de fertilidad utilizando método de interpolación IDW*



Fuente: Modificado de Clube do GIS. (2026)

3.3.3 Regresión geoespacial o cokriging por variables auxiliares

El enfoque de regresión geoespacial integra variables secundarias, tales como índices de vegetación, altitud, pendiente, orientación del relieve o conductividad eléctrica aparente, con el fin de mejorar la predicción espacial de nutrientes y otras propiedades del suelo, especialmente cuando la red de muestreo es escasa o presenta distribución irregular. Como plantearon McBratney, Mendonça Santos y Minasny (2003), la cartografía digital de suelos incrementa su capacidad predictiva cuando incorpora covariables

ambientales que representan de manera continua la influencia del paisaje sobre los atributos edáficos. En la misma línea, Hengl, Heuvelink y Rossiter (2007) explicaron que la regresión-kriging combina un modelo de tendencia basado en variables auxiliares con la interpolación geoestadística de los residuos, lo que permite integrar la dinámica química observada en laboratorio con la información espacial derivada de sensores remotos y modelos digitales del terreno.

Desde una perspectiva aplicada, este enfoque resulta especialmente útil en terrenos con topografía compleja, donde la distribución de materia orgánica, humedad, acidez o nutrientes disponibles está influida por procesos de erosión, acumulación y redistribución lateral. Zhang, Huang, Shen, Ye y Du (2012) mostraron que el uso de índices topográficos y variables categóricas del paisaje mejora la predicción espacial de la materia orgánica del suelo, mientras que Zhu y Lin (2010) evidenciaron que variables auxiliares como atributos del terreno y datos de inducción electromagnética pueden aumentar la precisión de la estimación espacial frente al kriging ordinario en paisajes contrastantes. Por ello, en laderas con marcada variabilidad geomorfológica, la inclusión de la pendiente y de índices espectrales de vegetación permite identificar con mayor claridad zonas de acumulación o pérdida de materia orgánica, refinando así la asignación localizada de cal, compost u otras enmiendas según la demanda real del suelo.

La elección entre kriging, IDW o regresión geoespacial debe sustentarse en la densidad y distribución del muestreo, en la complejidad topográfica del predio y en la disponibilidad de variables auxiliares confiables. Como señaló Goovaerts (1999), no existe un método universalmente superior para todos los casos, ya que el desempeño del interpolador depende de la estructura espacial de los datos y del contexto edáfico. En este sentido, Hengl (2007) propuso que la selección metodológica debe responder al equilibrio entre complejidad analítica, calidad predictiva y costo operativo. Por ello, una estrategia combinada, por ejemplo IDW como aproximación preliminar y regresión-kriging o kriging en áreas críticas, puede ser útil para maximizar

la relación costo-beneficio del proceso cartográfico. En todos los casos, la validación cruzada constituye una etapa esencial, porque permite ajustar el modelo y verificar la confiabilidad del mapa antes de usarlo como base para la toma de decisiones agronómicas; esta necesidad de contrastar la precisión predictiva también ha sido destacada en comparaciones recientes de métodos de interpolación espacial.

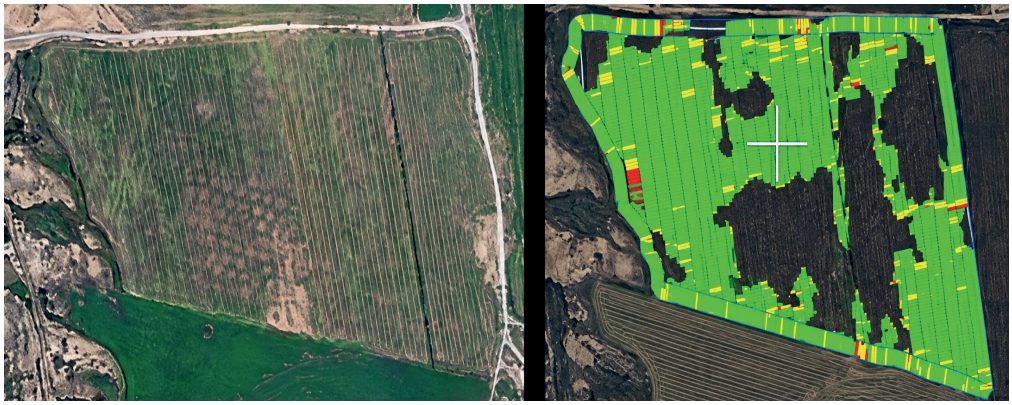
3.4 Aplicaciones de los mapas de fertilidad

Los mapas de fertilidad constituyen el insumo operativo por excelencia para la aplicación de insumos a tasa variable, estrategia orientada a sincronizar la oferta de nutrientes con la demanda real de cada unidad edáfica. Sawyer (1994) explicó que la lógica de esta tecnología consiste en abandonar la dosificación homogénea y ajustar la aplicación según la variabilidad espacial del terreno, de tal manera que las áreas con déficit nutricional reciban aportes correctivos, mientras que las zonas con niveles adecuados sean manejadas con dosis reducidas o, cuando corresponda, sin aplicación adicional. De esta forma, el mapa deja de ser únicamente una representación diagnóstica y se convierte en una herramienta directa de manejo agronómico.

La implementación de esta práctica ofrece tres beneficios principales. En primer lugar, permite adecuar la dosis a la necesidad puntual de cada sublote, evitando tanto deficiencias como excesos que pueden traducirse en menor rendimiento o en desequilibrios nutricionales. En segundo lugar, incrementa la eficiencia en el uso de nutrientes, porque mejora la coincidencia entre la localización del fertilizante y la capacidad de absorción del cultivo. En tercer lugar, favorece la optimización de costos y la sostenibilidad del sistema, al reducir insumos innecesarios y disminuir la presión ambiental asociada al uso excesivo de fertilizantes. En maíz, por ejemplo, Li et al. (2016) documentaron que el manejo nitrogenado sensor-based y a tasa variable puede reducir el uso total de nitrógeno sin disminuir el rendimiento del grano, además de disminuir pérdidas ambientales asociadas al ciclo del fertilizante.

Como aplicación demostrativa, en un cultivo de maíz establecido sobre suelos con marcada heterogeneidad de pH, el mapa de fertilidad permite delimitar franjas ácidas que requieren encalado localizado frente a sectores neutros o moderadamente balanceados que no demandan la misma intervención. Bajo este esquema, el ajuste sitial realizado mediante equipos con control de sección y dosis variable mejora la eficiencia del encalado, reduce el consumo total de enmienda y disminuye la probabilidad de sobrecorrección en áreas que no lo necesitan. En términos prácticos, este tipo de manejo fortalece la disponibilidad equilibrada de nutrientes y mejora la eficiencia económica y ambiental de la intervención, en coherencia con los principios generales de la fertilización variable expuestos por Sawyer (1994) y con la evidencia sobre beneficios agronómicos y ambientales del manejo de insumos de precisión reportada por Li et al. (2016) (ver figura 5).

Figura 5. *Interacción de parches de erosión en mapa de fertilidad*



Fuente: Modificado de GeoPard Agriculture. (2026)

3.5 Integración con tecnologías de agricultura de precisión

La generación de mapas de fertilidad constituye un paso estratégico dentro del ecosistema tecnológico de la AP, ya que estos productos cartográficos no permanecen como resultados aislados de laboratorio, sino que se articulan con plataformas digitales, controladores de maquinaria y

sistemas de posicionamiento global para orientar la aplicación diferenciada de insumos. Como explicaron Tola, Kataoka, Burce, Okamoto y Hata (2008), la AP requiere sistemas capaces de regular automáticamente la descarga de fertilizantes para responder al manejo sitio-específico, mientras que Chattha et al. (2014) mostraron que los esparcidores de tasa variable pueden trabajar con mapas de prescripción guiados por GPS e, incluso, combinar esa lógica cartográfica con sensores en tiempo real. En esa misma dirección, Mirzakhaninafchi et al. (2022) señalaron que las estrategias de tasa variable pueden operar mediante enfoques basados en mapas, en sensores o en una combinación de ambos, lo que amplía la capacidad de adaptación del sistema a la heterogeneidad espacial del lote.

Esta articulación tecnológica favorece una gestión agronómica más inteligente, porque permite que la dosificación de fertilizantes se ajuste durante la siembra o el desarrollo del cultivo según la condición real de cada unidad espacial. Mirzakhaninafchi et al. (2022) encontraron que la tecnología de tasa variable puede reducir costos de insumos, mejorar la productividad y contribuir a la protección ambiental, mientras que Li et al. (2016) documentaron, en maíz, beneficios ambientales del manejo nitrogenado basado en sensores, con reducción del uso del fertilizante sin comprometer el rendimiento. En consecuencia, la integración entre mapas de fertilidad, sistemas de control y sensores de cultivo fortalece la eficiencia agronómica, reduce pérdidas y consolida una agricultura más racional en el uso de recursos.

No obstante, la implementación de estas herramientas todavía enfrenta limitaciones importantes. Por una parte, la construcción de mapas de fertilidad exige muestreos georreferenciados, análisis de laboratorio y procesamiento espacial, lo que puede elevar los costos operativos, sobre todo cuando se busca alta resolución espacial. Por otra, la interoperabilidad entre plataformas de gestión, sensores, maquinaria y servicios de datos continúa siendo un reto técnico y organizacional. En este sentido, Urdu et al. (2024) identificaron la interoperabilidad como un desafío crítico para la digitalización agroalimentaria, particularmente en los planos semántico y

técnico, mientras que Kawamura (2023) destacó que el intercambio eficaz de datos entre plataformas agrícolas depende de interfaces, estándares y mecanismos de vinculación entre bases de datos que aún no siempre están plenamente armonizados.

Frente a estas limitaciones, el avance de la teledetección y del mapeo digital de suelos ha ampliado las posibilidades de capturar información sobre la variabilidad espacial con mayor cobertura y frecuencia. McBratney, Mendonça Santos y Minasny (2003) explicaron que el mapeo digital de suelos mejora cuando se integran observaciones de campo con covariables ambientales continuas, tales como relieve, imágenes remotas y otros indicadores espaciales. Bajo esta lógica, el muestreo georreferenciado del suelo adquiere un papel central, porque permite pasar de una visión promedio del terreno a una caracterización localizada que incorpora la topografía, los antecedentes de manejo, el uso previo del suelo y la variabilidad edafoclimática como criterios para la planificación del muestreo y la interpretación de resultados.

La combinación de sistemas de información geográfica, sensores remotos y análisis de laboratorio ha optimizado esta fase del diagnóstico, mejorando la representatividad de los puntos de muestreo y la utilidad agronómica de la información obtenida. A partir de estas muestras, es posible cuantificar variables como textura, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y disponibilidad de macro y micronutrientes, que luego se integran en mapas de fertilidad mediante técnicas de interpolación espacial. En términos metodológicos, esta secuencia convierte al suelo en una fuente de información operativa para el manejo de precisión, pues cada dato puntual puede transformarse en una recomendación espacialmente explícita para fertilización, encalado o aplicación de enmiendas.

Además, el desarrollo de técnicas analíticas rápidas ha abierto nuevas posibilidades para responder con mayor agilidad a la variabilidad intraparcela. El documento técnico de la FAO sobre espectroscopía vis-NIR y MIR señaló que estas metodologías se han consolidado como herramientas

importantes para el análisis cuantitativo del suelo, mientras que Jin et al. (2020) mostraron que la espectroscopía visible e infrarroja cercana puede emplearse para estimar potasio disponible con modelos predictivos robustos. De forma complementaria, Kahle, Kleber y Jahn (2002) destacaron que la difracción de rayos X sigue siendo una técnica fundamental para la caracterización cuantitativa de minerales arcillosos en suelos, lo que amplía el diagnóstico más allá de la química disponible e incorpora la dimensión mineralógica del comportamiento edáfico.

La síntesis de todos estos datos se materializa en la elaboración de mapas de fertilidad mediante procedimientos como kriging, IDW o regresión geoespacial, los cuales permiten operacionalizar la fertilización variable y asignar dosis diferenciadas según las necesidades de cada microambiente del campo. Como señalaron McBratney et al. (2003), el valor del mapeo digital radica precisamente en transformar datos dispersos en conocimiento espacialmente continuo para la toma de decisiones. En este sentido, la integración entre muestreo georreferenciado, análisis de laboratorio, sensores y plataformas digitales redefine la manera en que se gestiona el suelo en el siglo XXI, convirtiéndolo en un componente activo de la agricultura inteligente y en una base estratégica para la sostenibilidad productiva.

Síntesis final

El capítulo permite comprender que el muestreo georreferenciado del suelo constituye uno de los fundamentos operativos más importantes de la AP, ya que transforma el análisis edáfico convencional en un proceso espacialmente explícito, capaz de reconocer la heterogeneidad real del terreno. Como señalaron Mulla (2013) y Nawar, Corstanje, Halcro, Mulla y Mouazen (2017), el valor de este enfoque radica en que cada muestra deja de representar una condición promedio del lote y pasa a convertirse en una unidad de información localizada, útil para interpretar diferencias en fertilidad, textura, salinidad, acidez, materia orgánica y disponibilidad de nutrientes. De esta manera, la planificación del muestreo deja de ser una actividad rutinaria y se convierte en una decisión estratégica que

determina la calidad del diagnóstico y, en consecuencia, la precisión del manejo agronómico posterior.

A lo largo del capítulo también se evidenció que la calidad de la información obtenida depende tanto del diseño de los puntos de muestreo como de la rigurosidad de los análisis físico-químicos realizados en laboratorio. La determinación de textura, conductividad eléctrica, pH, materia orgánica y nutrientes disponibles permite construir una lectura integral del suelo, indispensable para formular recomendaciones diferenciadas de fertilización, encalado, riego y conservación. En este sentido, van Reeuwijk (2002), Smith y Doran (1996) y Walkley y Black (1934) mostraron que el análisis del suelo no solo describe propiedades aisladas, sino que aporta elementos para entender el funcionamiento del sistema edáfico y su relación con la productividad y la sostenibilidad. Así, el suelo se reconoce no como un simple soporte físico del cultivo, sino como un componente dinámico cuya evaluación técnica es esencial para el manejo eficiente de los recursos.

Otro aspecto central desarrollado en el capítulo fue la generación de mapas de fertilidad, entendidos como la síntesis espacial de la información edáfica recolectada en campo y procesada mediante métodos de interpolación. Como explicaron McBratney, Mendonça Santos y Minasny (2003), Goovaerts (1999) y Journel y Huijbregts (1978), la cartografía de fertilidad permite transformar datos puntuales en superficies continuas, facilitando la identificación de zonas con déficit, equilibrio o exceso de nutrientes. Métodos como el kriging, el IDW y la regresión geoespacial con variables auxiliares amplían la capacidad de representación del suelo y permiten ajustar el modelo de predicción a la complejidad del terreno, a la densidad del muestreo y a la disponibilidad de covariables ambientales. En consecuencia, los mapas de fertilidad se consolidan como herramientas técnicas de gran valor para delimitar microambientes y respaldar decisiones de manejo sitio-específico.

Finalmente, el capítulo puso en evidencia que la verdadera fortaleza de este enfoque surge cuando el muestreo georreferenciado, los análisis de laboratorio y la cartografía de fertilidad se integran con tecnologías propias de la AP, tales como SIG, sensores remotos, plataformas digitales y maquinaria de tasa variable. Sawyer (1994), Li et al. (2016) y Mirzakhaninafchi et al. (2022) coincidieron en que esta integración mejora la eficiencia en el uso de fertilizantes, reduce costos, disminuye pérdidas por lixiviación o sobreaplicación y fortalece la sostenibilidad ambiental de los sistemas productivos. En ese sentido, el capítulo 4 mostró que la gestión moderna del suelo exige una articulación entre conocimiento edafológico, análisis espacial y tecnología digital, permitiendo que cada hectárea sea interpretada según su condición particular y manejada con mayor precisión, racionalidad y responsabilidad agroambiental.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1: Diseño de un plan de muestreo estratificado para una finca heterogénea

Objetivo: Aplicar los principios de muestreo estratificado y considerar factores influyentes para diseñar un plan de muestreo óptimo en un escenario real.

Descripción: Asume que eres un ingeniero agrónomo consultor y un productor/agricultor te ha contratado para diseñar un plan de muestreo georreferenciado del suelo para su finca de 50 hectáreas, dedicada al cultivo de café. El productor te informa que la finca presenta una variabilidad significativa en topografía (zonas planas, laderas suaves y laderas pronunciadas), historia de uso del suelo (una sección fue bosque nativo convertido hace 10 años, otra zona ha sido cultivada intensivamente por 30 años, y una tercera zona tiene un historial desconocido), además afirma tener posibles problemas de erosión en algunas áreas. El objetivo del muestreo es generar mapas de fertilidad para la aplicación variable de cal y fertilizantes fosfatados.

Tareas:

1. **Identificación de Estratos:** Con base en la información proporcionada, ¿cómo dividirías la finca en estratos? Justifica con criterio técnico la decisión para cada estrato, indicando las propiedades del suelo que esperas que varíen significativamente en cada estrato (zona).

2. **Densidad de muestreo:** Realiza una propuesta de densidad de puntos de muestreo (número de puntos por hectárea o por estrato) y justifica tu elección, considerando la variabilidad esperada y la optimización de costos.

3. **Método de muestreo dentro de los estratos:** Dentro de cada estrato, ¿qué método de muestreo (cuadrícula regular, aleatorio, etc.) recomendarías y por qué?

4. **Tecnologías de apoyo:** ¿Qué tecnologías (SIG, sensores remotos, GPS, etc.) recomendarías utilizar para la planificación y ejecución del muestreo en esta finca específica? Describe brevemente cómo las integrarías.

5. **Discusión:** ¿Qué desafíos podrías enfrentar al implementar este plan de muestreo en la práctica? ¿Cómo mitigarías esos desafíos?

Ejercicio 2: Interpretación de resultados de análisis físico-químicos y toma de decisiones

Objetivo: Interpretar datos de análisis de suelo y tomar decisiones informadas sobre el manejo de la fertilidad.

Descripción: te llegan los resultados de análisis físico-químicos de cuatro muestras georreferenciadas tomadas en diferentes puntos de un campo de cultivo de papa. Los valores óptimos para papa en la región son: pH (5.5-6.5), CE (< 2 dS/m), Materia Orgánica (> 3%),

Nitrógeno Disponible (50-75 ppm), Fósforo Disponible (30-50 ppm), Potasio Disponible (150-200 ppm).

Punto de Muestreo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Latitud	X1	X2	X3	X4
Longitud	Y1	Y2	Y3	Y4
pH	4.8	6.2	7.1	5.9
CE (dS/m)	0.8	1.5	2.8	1.1
MO (%)	2.5	4.1	1.8	3.8
N Disponible (ppm)	35	60	25	70
P Disponible (ppm)	20	45	15	55
K Disponible (ppm)	120	180	80	210
Textura	Franco	Franco-Arcilloso	Arenoso	Franco-Arenoso

Tareas:

1. Análisis por punto: Para cada punto de muestreo, identifica las propiedades del suelo que estén fuera del rango óptimo para el cultivo de papa.

2. Diagnóstico del problema: Describe el principal problema de fertilidad o caracteriza las desventajas del suelo en cada punto basándote en tabla de resultados.

3. Recomendaciones de manejo: realiza una propuesta de al menos dos recomendaciones de manejo específicas (tipo y dosis de

fertilizante, enmiendas, prácticas culturales, etc.) para cada punto de muestreo, orientadas a la corrección y mejora de las condiciones del suelo para el cultivo de papa.

Discusión: ¿Cómo la información georreferenciada de estas muestras permite una gestión más eficiente en comparación con un muestreo de suelos tradicional? ¿Qué limitaciones podrías encontrar al basar tus recomendaciones únicamente en estos datos?

Ejercicio 3: Comparación crítica de métodos de interpolación para mapas de fertilidad

Objetivo: Analizar y comparar los métodos de interpolación espacial utilizados en la generación de mapas de fertilidad, identificando sus ventajas y desventajas en diferentes escenarios.

Descripción: Eres parte de un equipo de investigación en AP y se te ha encomendado la tarea de decidir el método de interpolación más apropiado para generar mapas de fertilidad de fósforo (P) en esta zona agrícola. El campo tiene una variabilidad de AP conocida, que no es completamente aleatoria, pero presenta algunos puntos dispersos. Se dispone de 100 puntos de muestreo distribuidos uniformemente.

Tareas:

1. Descripción de métodos: Describe brevemente el principio de funcionamiento de Kriging, Interpolación por Vecinos Más Cercanos (IDW) y Regresión Geoespacial.

2. Análisis comparativo (Ventajas y Desventajas): Para cada uno de los tres métodos, elabora una tabla comparativa destacando sus principales ventajas y desventajas en el contexto de la generación de mapas de fertilidad del suelo. Considera aspectos como la precisión, el costo computacional, la necesidad de conocimientos estadísticos y la capacidad de manejar la autocorrelación espacial.

3. Selección y justificación: ¿Qué método de interpolación recomendarías para el escenario descrito (campo con variabilidad de AP y "puntos calientes/fríos") y por qué? Justifica tu elección basándote en las características del campo y las propiedades de los métodos.

4. Discusión: ¿En qué situaciones específicas sería más apropiado usar IDW en lugar de Kriging, o viceversa? ¿Cuándo la regresión geoespacial podría ser una opción superior a los otros dos métodos?

Ejercicio 4: Desafíos y futuro de la AP en países en desarrollo

Objetivo: Fomentar el debate sobre los desafíos de implementar la AP en diferentes contextos y reflexionar sobre su potencial y barreras futuras.

Descripción: La AP, el muestreo georreferenciado y los mapas de fertilidad, ofrece enormes beneficios. Sin embargo, su adopción no es fácil en todo el planeta. En países en desarrollo, como Colombia, existen factores socioeconómicos, tecnológicos e infraestructurales que pueden limitar su implementación masiva.

Tareas:

1. **Identificación de desafíos:** En un contexto de país en desarrollo como es Colombia ¿cuáles serían los principales desafíos técnicos, económicos y sociales para la adopción generalizada del muestreo georreferenciado y la generación de mapas de fertilidad en pequeñas y medianas fincas?

2. **Estrategias de adaptación:** Realiza una propuesta al menos de tres estrategias concretas para adaptar y promover el uso de estas tecnologías en dichos contextos latinoamericanos, considerando la reducción de costos, la capacitación y el acceso a la tecnología.

3. **Rol Gubernamental y académico:** ¿Qué papel deberían jugar los gobiernos, las universidades y las organizaciones no gubernamen-

tales en la adaptación y facilitación de la adopción de la AP en los ápices latinoamericanos?

Discusión: ¿Es la AP un "lujo" para los países desarrollados o una necesidad creciente para la seguridad alimentaria global? define tu posición y argumenta. ¿Qué innovaciones tecnológicas emergentes podrían ayudar a superar estos desafíos?

Ejercicio 5: Caso Práctico Integrado: Optimización de la fertilización de nitrógeno en maíz

Objetivo: Integrar los conocimientos de planificación de muestreo, análisis de suelo y generación de mapas para una aplicación práctica de fertilización variable.

Descripción: Una cooperativa agrícola en el Valle, desea optimizar la fertilización nitrogenada en 100 hectáreas de maíz. Esta cooperativa ha notado variaciones significativas en el rendimiento dentro de los campos y buscan implementar un sistema de fertilización variable basado en las necesidades reales del suelo. Sabiendo que el nitrógeno es un nutriente muy móvil y su disponibilidad varía considerablemente.

Tareas:

1. Planificación del muestreo de N:

- Considerando que el N es un nutriente móvil y crucial para el maíz, ¿qué tipo de muestreo (en cuadrícula, estratificado por rendimiento histórico si hay datos disponibles, o una combinación) sería más adecuado y por qué?
- ¿A qué profundidad recomiendas tomar las muestras de suelo para N y por qué?

- ¿Qué frecuencia de muestreo recomendarías para el N a lo largo del ciclo del cultivo si se quiere una gestión muy precisa? Justifica con criterio técnico tu respuesta.

2. Análisis de N y otros indicadores:

- Además de la concentración de N disponible en el suelo, ¿qué otros parámetros físico-químicos serían cruciales analizar para una gestión eficiente del N y por qué? (ej. MO, pH, CE, humedad).

- ¿Qué técnicas de análisis de N recomendarías (ej. extracción con KCl, Kjeldahl para N total)?

3. Generación y uso del mapa de N:

- Una vez obtenidos los datos de N, ¿qué método de interpolación espacial crees que serían más apropiados para generar un mapa de distribución de N en el campo y por qué?

- ¿Cómo se utilizaría este mapa de N para la aplicación variable del fertilizante? Describe el proceso desde el mapa hasta la operación en campo.

4. Discusión sobre Eficiencia:

- ¿Cuáles son los principales beneficios económicos y ambientales de implementar una fertilización nitrogenada variable basada en mapas de fertilidad en comparación con una aplicación uniforme?

- ¿Qué riesgos o limitaciones podrían surgir al aplicar esta estrategia (ej., errores de muestreo, variabilidad a corto plazo, equipos)?

Referencias

Agrositio. (2022, 17 de octubre). *Ahora es posible identificar la variación de absorción de nitrógeno dentro del lote en el día a día*. https://www.agrositio.com.ar/noticia/225587-ahora-es-posible-identificar-la-variacion-de-absorcion-de-nitrogeno-dentro-del-lote-en-el-dia-a-dia.html

Bakhsh, A., Kanwar, R. S., & Malone, R. W. (2007). Role of landscape and hydrologic attributes in developing and interpreting yield clusters. *Geoderma, 140*(3), 235–246. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.008

Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., van der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability, 9*(8), 1339. https://doi.org/10.3390/su9081339

Basso, B., Bertocco, M., Sartori, L., & Martin, E. C. (2007). Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. *European Journal of Agronomy, 26*(2), 82–91. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.008

Beretta, A. N., Silbermann, A. V., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R., & García-Lamohte, A. (2014). Soil texture analyses using a hydrometer: Modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e Investigación Agraria, 41*(2), 263–271. https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2013). *Agricultura de precisão*. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo.

Chattha, H. S., Zaman, Q. U., Chang, Y. K., Read, S., Schumann, A. W., Brewster, G. R., & Farooque, A. A. (2014). Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry. *Computers*

and Electronics in Agriculture, 100, 70–78. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.012

Clube do GIS. (2025). *Agricultura de precisão com QGIS* [Imagen de mapa de prescripción de calagem por interpolación IDW]. https://clubedogis.com.br/cursos/agricultura-de-precisao-com-qgis/

Delgado, J. A., Groffman, P. M., Nearing, M. A., Goddard, T., Reicosky, D., Lal, R., Kitchen, N. R., Rice, C. W., Towery, D., & Salon, P. (2011). Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation, 66*(4), 118A–129A. https://doi.org/10.2489/jswc.66.4.118A

DroneScope. (2025). *DRONESCOPE: Una nueva forma de ver tu negocio* [Captura de pantalla de plataforma de monitoreo agrícola para conteo de plantas]. https://dronescope.ag/

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1980). *Soil and plant testing and analysis: Report of an expert consultation held in Rome, 13–17 June 1977* (FAO Soils Bulletin No. 38/1). https://www.fao.org/4/ar118e/ar118e.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.).

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Standard operating procedure for saturated soil paste extract*. https://doi.org/10.4060/cb3355en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021a). *Standard operating procedure for soil electrical conductivity, soil/water, 1:5*. https://doi.org/10.4060/cb3354en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021b). *Standard operating procedure for soil pH determination*. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb3637en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *A primer on soil analysis using visible and near-infrared (vis-NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy*. https://doi.org/10.4060/cb9005en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). *Standard operating procedure for soil organic matter using the loss on ignition method*. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd8125en

Fraisse, C. W., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2001). Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE, 44*(1), 155–166. https://doi.org/10.13031/2013.2296

Fu, T., Gao, H., & Liu, J. (2021). Comparison of different interpolation methods for prediction of soil salinity in arid irrigation region in northern China. *Agronomy, 11*(8), 1535. https://doi.org/10.3390/agronomy11081535

Gavlak, R., Horneck, D., & Miller, R. O. (2005). *Soil, plant and water reference methods for the western region* (3rd ed.). Western Region Extension Publication.

Ge, X., Wang, J., Ding, J., Cao, X., Zhang, Z., Liu, J., & Li, X. (2019). Combining UAV-based hyperspectral imagery and machine learning algorithms for soil moisture content monitoring. *PeerJ, 7*, e6926. https://doi.org/10.7717/peerj.6926

GeoPard Agriculture. (2025). *Soil data analytics* [Captura de pantalla de plataforma de análisis e interacción de mapas de fertilidad]. https://geopard.tech/blog/432ca9jhnt-zones-quality/

Gonçalves, J. R. M. R., Ferraz, G. A. e S., Reynaldo, É. F., Marin, D. B., Ferraz, P. F. P., Pérez-Ruiz, M., Rossi, G., Vieri, M., & Sarri, D. (2021). Comparative analysis of soil-sampling methods used in precision agriculture. *Journal of Agricultural Engineering, 52*(1), 1–12. https://doi.org/10.4081/jae.2021.1117

Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma, 89*(1–2), 1–45. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0

Hengl, T. (2007). *A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables*. Office for Official Publications of the European Communities.

Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences, 33*(10), 1301–1315. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001

Jin, X., Du, J., Liu, H., Wang, Z., & Song, K. (2020). Prediction of soil-available potassium content with visible near-infrared ray spectroscopy of different pretreatment transformations by the boosting algorithms. *Applied Sciences, 10*(4), 1520. https://doi.org/10.3390/app10041520

Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining geostatistics*. Academic Press.

Kahle, M., Kleber, M., & Jahn, R. (2002). Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils: The suitability of mineral intensity factors. *Geoderma, 109*(3–4), 191–205. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00175-1

Kawamura, T. (2023). Information platforms for smart agriculture. En Q. Zhang (Ed.), *Encyclopedia of digital agricultural technologies* (pp. 662–672). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_184

Kitchen, N. R., Drummond, S. T., Lund, E. D., Sudduth, K. A., & Buchleiter, G. W. (2003). Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal, 95*(3), 483–495. https://doi.org/10.2134/agronj2003.4830

Li, A., Duval, B. D., Anex, R. P., Scharf, P. C., Ashtekar, J. M., Owens, P. R., & Ellis, C. (2016). A case study of environmental benefits of sensor-based

nitrogen application in corn. *Journal of Environmental Quality, 45*(2), 675–681. https://doi.org/10.2134/jeq2015.07.0404

Marques da Silva, J. R., & Silva, L. L. (2008). Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystems Engineering, 101*(2), 183–190. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.07.003

McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma, 117*(1–2), 3–52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*.

Mirzakhaninafchi, H., Singh, M., Dixit, A. K., Prakash, A., Sharda, S., Kaur, J., & Mirzakhani Nafchi, A. (2022). Performance assessment of a sensor-based variable-rate real-time fertilizer applicator for rice crop. *Sustainability, 14*(18), 11209. https://doi.org/10.3390/su141811209

Motsara, M. R., & Roy, R. N. (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis* (FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No. 19). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/i0131e/i0131e00.htm

Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, 114*(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Mylavarapu, R. S., & Lee, W. D. (2008). UF/IFAS Nutrient Management Series: Soil sampling strategies for precision agriculture: SL 190/SS402. *EDIS, 2008*(6). https://doi.org/10.32473/edis-ss402-2002

Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. *Advances in Agronomy, 143*, 175–245. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003

Peralta, N. R., Costa, J. L., Balzarini, M., & Angelini, H. (2013). Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern Pampas. *Canadian Journal of Soil Science, 93*(2), 205–218. https://doi.org/10.4141/cjss2012-022

Rodríguez-Garay, F. A., Camacho-Tamayo, J. H., y Rubiano-Sanabria, Y. (2016). Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 17*(2), 237–254. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:493

Rosas-Velásquez, D. A., Arévalo-Valderrama, G. E., y Pineda-Mejía, R. (2021). Manejo diferencial de los suelos mediante el uso de prácticas de agricultura de precisión para la producción de semilla de frijol y sorgo. *Ceiba*, 84–101. https://revistas.zamorano.edu/CEIBA/article/download/1270/1206/3415

Sawyer, J. E. (1994). Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. *Journal of Production Agriculture, 7*(2), 195–201. https://doi.org/10.2134/jpa1994.0195

Sikora, F. J., & Moore, K. P. (Eds.). (2014). *Soil test methods from the southeastern United States* (Southern Cooperative Series Bulletin No. 419). https://aesl.ces.uga.edu/sera6/PUB/MethodsManualFinalSERA6.pdf

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing, 12*(19), 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136

Smith, J. L., & Doran, J. W. (1996). Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. En J. W. Doran & A. J. Jones (Eds.), *Methods for assessing soil quality* (SSSA Special Publication No. 49, pp. 169–185). Soil Science Society of America.

Stenberg, B., Viscarra Rossel, R. A., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy, 107*, 163–215. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7

Tola, E., Kataoka, T., Burce, M., Okamoto, H., & Hata, S. (2008). Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement. *Biosystems Engineering, 101*(4), 411–416. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.019

Urdu, D., Berre, A. J., Sundmaeker, H., Rilling, S., Roussaki, I., Marguglio, A., Doolin, K., Zaborowski, P., Atkinson, R., Palma, R., Faraldi, M., & Wolfert, S. (2024). Aligning interoperability architectures for digital agri-food platforms. *Computers and Electronics in Agriculture, 224*, 109194. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109194

Vallentin, C., Dobers, E. S., Itzerott, S., Kleinschmit, B., & Spengler, D. (2020). Delineation of management zones with spatial data fusion and belief theory. *Precision Agriculture, 21*, 876–899. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09696-0

Van Reeuwijk, L. P. (Comp.). (1998). *Guidelines for quality management in soil and plant laboratories* (FAO Soils Bulletin No. 74). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Van Reeuwijk, L. P. (Ed.). (2002). *Procedures for soil analysis* (6th ed., Technical Paper No. 9). ISRIC.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of

the chromic acid titration method. *Soil Science, 37*(1), 29–38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

Wollenhaupt, N. C., Wolkowski, R. P., & Clayton, M. K. (1994). Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *Journal of Production Agriculture, 7*(4), 441–448. https://doi.org/10.2134/jpa1994.0441

Yigini, Y., Olmedo, G. F., Reiter, S., Baritz, R., Viatkin, K., & Vargas, R. (2018). *Soil organic carbon mapping cookbook* (2nd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Zhang, S., Huang, Y., Shen, C., Ye, H., & Du, Y. (2012). Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information. *Geoderma, 171–172*, 35–43. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.012

Zhu, Q., & Lin, H. S. (2010). Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere, 20*(5), 594–606. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60049-5

Capítulo 5

Uso de Sensores para Monitoreo de Cultivos



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. Comprender la importancia de los sensores en la AP como herramientas fundamentales para monitorear el estado del cultivo, interpretar la variabilidad espacial y temporal, y apoyar decisiones agronómicas basadas en datos.

2. Diferenciar los principales tipos de sensores utilizados en el monitoreo agrícola, incluyendo sensores directos, proximales y remotos, reconociendo sus principios de funcionamiento, variables medidas, ventajas, limitaciones y aplicaciones en campo.

3. Interpretar datos provenientes de sensores de suelo, planta y ambiente, tales como humedad del suelo, temperatura, conductividad eléctrica, pH, estado hídrico, vigor vegetal, radiación y condiciones microclimáticas asociadas al desarrollo del cultivo.

4. Analizar el uso de sensores remotos instalados en drones, satélites y otras plataformas para la detección temprana de estrés hídrico, deficiencias nutricionales, problemas fitosanitarios, variaciones en biomasa y cambios en la cobertura vegetal.

5. Reconocer la utilidad agronómica de los índices de vegetación, como NDVI, EVI, SAVI, GNDVI y NDRE, para evaluar vigor, contenido de clorofila, actividad fotosintética, sanidad del cultivo y delimitación de zonas de manejo diferenciado.

6. Integrar información obtenida mediante sensores con herramientas SIG, plataformas digitales, Internet de las Cosas e inteligencia artificial, con el fin de generar mapas, alertas tempranas y recomendaciones de manejo más precisas.

7. Aplicar criterios técnicos para seleccionar sensores adecuados según el cultivo, la escala productiva, las condiciones agroclimáticas, la topografía, la conectividad disponible, el presupuesto y los objetivos de monitoreo del productor.

8. Evaluar el aporte del monitoreo sensórico a la optimización del riego, la fertilización, el manejo fitosanitario, la reducción de costos, la trazabilidad productiva y la sostenibilidad ambiental de los sistemas agrícolas y agroforestales.

9. Valorar críticamente las limitaciones asociadas al uso de sensores en agricultura, incluyendo costos de adopción, calibración, mantenimiento, calidad de los datos, interoperabilidad entre plataformas, conectividad rural y necesidad de formación técnica.

10. Proponer estrategias de implementación gradual de sensores en sistemas agrícolas, agroforestales y familiares, articulando innovación tecnológica, conocimiento agronómico, análisis territorial y toma de decisiones adaptada a las condiciones locales.

Conceptos clave

- Sensores agrícolas: Dispositivos tecnológicos diseñados para captar información del suelo, la planta o el ambiente, con el fin de monitorear el estado del cultivo y apoyar decisiones agronómicas basadas en datos.

- Monitoreo del cultivo: Proceso sistemático de observación, medición e interpretación de variables fisiológicas, edáficas y ambientales que permiten evaluar el crecimiento, vigor, sanidad y respuesta del cultivo a las prácticas de manejo.

- Sensores directos: Equipos que realizan mediciones en contacto directo o muy cercano con el suelo, la planta o el ambiente inmediato del cultivo, registrando variables como humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica o estado hídrico.

- Sensores proximales: Dispositivos instalados en campo o transportados cerca del cultivo, capaces de captar información detallada sobre variables del suelo o de la planta sin depender exclusivamente de plataformas aéreas o satelitales.

- Sensores remotos: Instrumentos que obtienen información del cultivo o del terreno sin contacto físico directo, mediante satélites, drones, aeronaves o cámaras especializadas que captan radiación reflejada o emitida por la vegetación.

- Teledetección agrícola: Técnica que permite observar y analizar cultivos a distancia mediante sensores ópticos, multiespectrales, hiperespectrales o térmicos, facilitando la detección de variabilidad, estrés y cambios en la cobertura vegetal.

- Sensor multiespectral: Equipo que capta información en varias bandas específicas del espectro electromagnético, especialmente en el visible, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano, para evaluar vigor, clorofila, biomasa y estado fisiológico del cultivo.

- Sensor hiperespectral: Sensor avanzado que registra información en numerosas bandas estrechas del espectro electromagnético, permitiendo una caracterización más detallada del estado bioquímico, fisiológico y sanitario de la vegetación.

- Sensor térmico: Dispositivo que mide la temperatura superficial del dosel vegetal o del suelo, útil para identificar estrés hídrico, cierre estomático, variaciones microclimáticas y diferencias en la transpiración del cultivo.

- Índices de vegetación: Relaciones matemáticas construidas a partir de bandas espectrales, utilizadas para estimar vigor vegetal, biomasa, contenido de clorofila, actividad fotosintética, cobertura y condiciones de estrés.

- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, ampliamente utilizado para evaluar el vigor y la actividad fotosintética del cultivo mediante la relación entre la reflectancia del rojo visible y el infrarrojo cercano.

- EVI: Índice de Vegetación Mejorado, diseñado para reducir efectos atmosféricos y de saturación en coberturas densas, permitiendo una evaluación más estable del vigor vegetal en cultivos con alta biomasa.

- SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, útil en etapas tempranas del cultivo o en áreas con baja cobertura vegetal, ya que reduce la influencia del brillo del suelo sobre la interpretación espectral.

- GNDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde, empleado para estimar contenido de clorofila, actividad fotosintética y estado nutricional del cultivo, especialmente en relación con nitrógeno.

- NDRE: Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo, sensible a cambios en clorofila y vigor vegetal en etapas avanzadas del cultivo, cuando el NDVI puede presentar saturación.

- Estrés hídrico: Condición en la que la disponibilidad de agua es insuficiente para satisfacer la demanda fisiológica del cultivo, afectando procesos como transpiración, fotosíntesis, crecimiento y rendimiento.

- Estrés nutricional: Alteración fisiológica causada por deficiencia, exceso o desbalance de nutrientes esenciales, que puede manifestarse en cambios de coloración, menor crecimiento, reducción de vigor o alteraciones espectrales detectables por sensores.

- Temperatura del dosel: Medida térmica de la superficie foliar del cultivo, utilizada como indicador indirecto de transpiración, estado hídrico y funcionamiento estomático.

- Conductividad eléctrica del suelo: Variable que expresa la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica, relacionada con salinidad, humedad, textura, contenido de arcilla y variabilidad edáfica.

- Humedad del suelo: Cantidad de agua disponible en el perfil del suelo, fundamental para programar el riego, prevenir déficit hídrico y optimizar la eficiencia del uso del agua.

- Internet de las Cosas agrícola: Red de sensores, estaciones, dispositivos y plataformas conectadas que capturan y transmiten datos en tiempo real para monitorear el sistema suelo-planta-atmósfera.

- Alertas tempranas: Avisos generados a partir de sensores, modelos o plataformas digitales cuando una variable supera un umbral crítico, permitiendo intervenir oportunamente ante estrés hídrico, riesgo fitosanitario o deficiencias nutricionales.

- Plataforma digital agrícola: Sistema informático que integra datos provenientes de sensores, drones, satélites, estaciones meteorológicas y registros de campo para visualizar, analizar y apoyar decisiones de manejo.

- Mapa de variabilidad: Representación espacial de las diferencias presentes dentro de un lote, construida a partir de datos de sensores, imágenes remotas o muestreos georreferenciados.

- Zona de manejo: Área relativamente homogénea dentro del cultivo, definida a partir de variables de suelo, vigor, humedad, rendimiento o sanidad, que puede recibir un manejo agronómico diferenciado.

- Monitoreo en tiempo real: Seguimiento continuo o frecuente de variables del cultivo, suelo o clima mediante sensores conectados, lo que permite detectar cambios rápidamente y ajustar las decisiones de manejo.

- Inteligencia artificial en monitoreo agrícola: Uso de algoritmos capaces de analizar grandes volúmenes de datos sensoriales, identificar patrones, predecir riesgos y generar recomendaciones agronómicas más precisas.

- Aprendizaje automático: Rama de la inteligencia artificial que permite entrenar modelos con datos históricos y actuales para clasificar estados del cultivo, predecir rendimiento, detectar estrés o anticipar problemas fitosanitarios.

- Big data agrícola: Conjunto masivo y diverso de datos generados por sensores, drones, satélites, maquinaria y plataformas digitales, cuyo análisis permite comprender mejor la dinámica del cultivo y mejorar la toma de decisiones.

- Calibración de sensores: Proceso técnico mediante el cual se ajustan los equipos de medición para garantizar que los datos obtenidos sean confiables, comparables y agronómicamente interpretables.

- Interoperabilidad: Capacidad de diferentes sensores, equipos, plataformas y programas para compartir, integrar y procesar datos de manera compatible y funcional.

- Toma de decisiones basada en datos: Proceso mediante el cual las prácticas de manejo agrícola se definen a partir de información objetiva, medible y georreferenciada, en lugar de depender únicamente de la observación visual o la experiencia empírica.

- Manejo sitio-específico: Estrategia agronómica que ajusta riego, fertilización, control fitosanitario u otras labores según las condiciones particulares de cada zona del cultivo.

- Agricultura predictiva: Enfoque que utiliza sensores, datos históricos, modelos y algoritmos para anticipar necesidades del cultivo, riesgos productivos o eventos de estrés antes de que generen pérdidas significativas.

- Sostenibilidad del monitoreo sensórico: Capacidad de los sistemas de sensores para mejorar la eficiencia productiva, reducir el uso innecesario de insumos, disminuir impactos ambientales y fortalecer la resiliencia del agroecosistema.

Desarrollo técnico

Uso de sensores para el monitoreo del cultivo

En las últimas décadas, la AP se ha consolidado como una estrategia avanzada para la gestión de los sistemas agrícolas, al permitir decisiones sustentadas en datos oportunos, georreferenciados y agronómicamente interpretables. En este contexto, Zhang, Wang y Wang (2002) señalaron que el desarrollo de la AP depende de la capacidad de medir y manejar la variabilidad espacial y temporal del cultivo, mientras que Gebbers y Adamchuk (2010) destacaron que estas tecnologías contribuyen simultáneamente a mejorar la productividad y a reducir la presión ambiental derivada del uso ineficiente de insumos. Bajo esta lógica, el uso de sensores directos y remotos para el monitoreo del cultivo constituye una herramienta central para optimizar agua, fertilizantes y decisiones de manejo dentro de cada unidad productiva.

1. Tipos de sensores: directos y remotos

La clasificación general de los sensores utilizados en AP se basa, principalmente, en su ubicación y en la forma en que captan la información.

Los sensores directos, también denominados sensores de contacto o proximales, se instalan en el entorno inmediato del cultivo, ya sea en el suelo, sobre la planta o en el microclima circundante, y permiten registrar en tiempo real variables como humedad del suelo, temperatura, conductividad eléctrica, pH y, en algunos casos, condiciones nutricionales. Jones (2004) explicó que este tipo de monitoreo resulta especialmente valioso para el manejo hídrico, porque permite ajustar el riego a partir de respuestas medidas en el suelo o en la planta, mientras que Zhang et al. (2002) resaltaron su utilidad dentro de esquemas de manejo sitio-específico donde cada medición puntual puede vincularse con una localización concreta del lote.

En contraste, los sensores remotos operan desde plataformas alejadas físicamente del cultivo, como satélites, aeronaves o drones, y permiten adquirir información espectral, térmica y multiespectral sobre extensas superficies agrícolas. Mulla (2013) mostró que la teledetección ha sido una de las áreas más influyentes en la evolución reciente de la AP, debido a su capacidad para detectar variaciones en vigor, estrés hídrico, estado nutricional y patrones espaciales del cultivo. De manera complementaria, Zhang et al. (2002) indicaron que este tipo de sensores amplía el monitoreo desde la escala puntual hacia la escala de lote o paisaje, lo que facilita la elaboración de mapas de variabilidad y el diseño de intervenciones diferenciadas.

Desde una visión integral, la AP ha redefinido el paradigma del monitoreo agronómico al incorporar sensores como núcleos estructurales de la toma de decisiones. En este sentido, Gebbers y Adamchuk (2010) argumentaron que la incorporación sistemática de sensores de campo y de observación remota permite mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes, agua y otros insumos, al tiempo que fortalece la sostenibilidad del sistema productivo. Por ello, el uso de sensores no solo tiene una justificación técnica y económica, sino también una clara relevancia ecológica, dado que favorece una producción más racional y ambientalmente responsable.

1.1 Sensores directos

Los sensores directos son dispositivos diseñados para captar de forma inmediata y continua variables del entorno edáfico y vegetal mediante contacto físico directo con el objeto de medición. En AP, estos sensores constituyen una fuente estratégica de datos altamente localizados, útiles para caracterizar la variabilidad del sistema suelo-planta-atmósfera dentro del lote. Zhang et al. (2002) señalaron que estos instrumentos pueden integrarse a maquinaria agrícola automatizada o emplearse mediante equipos portátiles, generalmente asociados con sistemas de posicionamiento global y plataformas de información geográfica, lo que permite relacionar cada lectura con su ubicación exacta en el terreno. Esta capacidad convierte a los sensores directos en herramientas especialmente valiosas para el monitoreo intensivo y la toma de decisiones por sitio específico.

Pierce y Nowak (1999) sostuvieron que la fortaleza de los sensores directos radica en su capacidad para abordar la heterogeneidad intrínseca del suelo y del cultivo, identificando zonas críticas relacionadas con restricciones hídricas, nutricionales o estructurales. Desde esta perspectiva, la información que antes requería muestreos extensos, lentos y, en muchos casos, destructivos, puede ahora obtenerse de manera más continua y con mayor resolución espacial. En consecuencia, estos sensores proporcionan una base sólida para la formulación de estrategias de riego de precisión, fertilización diferenciada y prácticas de conservación del suelo, contribuyendo a una agricultura más eficiente y sustentada en el conocimiento detallado del comportamiento del sistema productivo.

Históricamente, la génesis y evolución de los sensores directos puede ubicarse en la segunda mitad del siglo XX, cuando los avances en microelectrónica, automatización y control favorecieron la miniaturización de equipos de medición y su transferencia progresiva al ámbito agrícola. Adamchuk, Hummel, Morgan y Upadhyaya (2004) señalaron que el desarrollo de sensores en movimiento permitió aumentar drásticamente la densidad de observaciones del suelo en comparación con el muestreo

convencional, lo que marcó la transición desde una agricultura basada en promedios hacia una gestión diferenciada por sitio. En ese contexto, durante la expansión de la AP en Estados Unidos y Europa, comenzaron a integrarse a la maquinaria agrícola sensores capaces de estimar conductividad eléctrica aparente, pH, contenido de agua y otras propiedades del suelo directamente durante las operaciones de campo. Más adelante, la incorporación de sensores ópticos activos y de sistemas electroquímicos amplió la capacidad diagnóstica del monitoreo en tiempo real, consolidando una agricultura cada vez más apoyada en datos continuos y georreferenciados.

En la actualidad, los sensores directos pueden clasificarse según el parámetro medido y la tecnología empleada. Un primer grupo corresponde a los sensores electromagnéticos, entre los que destacan los medidores de conductividad eléctrica aparente del suelo. Corwin y Lesch (2005) explicaron que la ECa se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas en AP para caracterizar la variabilidad espacial del campo, debido a que se relaciona con propiedades como textura, salinidad, contenido de agua y, en determinados contextos, profundidad efectiva del suelo. Por ello, estos dispositivos resultan particularmente útiles para delimitar unidades de manejo relativamente homogéneas y ajustar la fertilización o el muestreo a la heterogeneidad real del terreno.

Un segundo grupo lo conforman los sensores ópticos activos, diseñados para emitir su propia fuente de luz y medir la reflectancia del dosel en bandas específicas del espectro, reduciendo así la dependencia de la radiación solar incidente. Raun et al. (2001) y Raun et al. (2002) demostraron que este tipo de sensores permite estimar el potencial de rendimiento y mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno en cereales mediante recomendaciones de fertilización en tiempo real. A partir de esta línea de trabajo se consolidaron plataformas como GreenSeeker, ampliamente asociadas al uso de índices de vegetación para diagnosticar deficiencias nutricionales y orientar aplicaciones variables de nitrógeno. En términos agronómicos, estos sensores permiten detectar variaciones en vigor, clorofila y estrés incipiente con una resolución espacial que resulta muy valiosa para el manejo sitio-específico.

Un tercer conjunto corresponde a los sensores químicos y electroquímicos, los cuales emplean electrodos selectivos de iones y otros principios analíticos para estimar in situ variables como pH, nitrato y potasio. Sethuramasamyraja, Adamchuk, Marx, Dobermann, Meyer y Jones (2007) reportaron el desarrollo y análisis de una metodología basada en electrodos selectivos que permitió mapear simultáneamente pH, nitrato residual y potasio soluble en movimiento, mostrando el potencial de estas herramientas para sustituir, en parte, esquemas de muestreo más lentos y costosos. Junto a ello, los sensores de humedad del suelo, especialmente los basados en TDR y FDR, se han consolidado como tecnologías clave para el monitoreo continuo del contenido volumétrico de agua. Robinson et al. (2008) destacaron la relevancia de estos sistemas en observatorios hidrológicos y ecológicos, mientras que estudios posteriores han señalado que TDR y FDR se han convertido en métodos de referencia para la medición rápida y automatizable de la humedad del suelo en un amplio rango de condiciones.

En conjunto, la trayectoria evolutiva de los sensores directos (ver figura 1) evidencia una convergencia tecnológica orientada a maximizar la eficiencia en el uso de insumos, mejorar la resolución espacial del diagnóstico agronómico y reducir el impacto ambiental de la producción agrícola. Como sintetizaron Adamchuk et al. (2004), el valor de estos sistemas no radica únicamente en medir más rápido, sino en generar información suficientemente densa y oportuna para sostener decisiones de manejo de precisión. Así, desde los primeros desarrollos electromagnéticos hasta las plataformas ópticas y electroquímicas actuales, los sensores directos han fortalecido la base científica de la AP y han redefinido el vínculo entre medición, interpretación y acción agronómica en campo.

Figura 1. *Imágenes de sensores de pH y Conductividad*



Fuente: Hanna Instruments. (2025).

En cuanto a los sensores destinados al registro de temperatura y de variables microclimáticas (ver figura 2), en la práctica se emplean con frecuencia termistores, termopares y sensores capacitivos de humedad relativa, los cuales suelen integrarse en estaciones agroclimáticas automáticas o en nodos distribuidos de IoT agrícola para realizar mediciones continuas del ambiente. La revisión técnica sobre instrumentación de estaciones meteorológicas agrícolas difundida por la FAO indicó que los termistores y termopares son sensores habituales para medir temperatura del aire y del suelo en estaciones automáticas, mientras que los higrómetros capacitivos basados en cambios dieléctricos se utilizan ampliamente para registrar humedad relativa en sistemas electrónicos modernos. A su vez, Arteaga-Ramírez, Cervantes-Osornio, Vázquez-Peña y Ojeda-Bustamante (2017) mostraron la utilidad de las estaciones automáticas para registrar variables atmosféricas clave en contextos agrícolas, y Kalaany, Kimaita, Abdelmoneim, Khadra, Derardja y Dragonetti (2025) señalaron que las estaciones agroclimáticas basadas en IoT han fortalecido el monitoreo continuo y el soporte a la toma de decisiones en agricultura climáticamente inteligente. La información derivada de estos sistemas, como temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío y déficit de presión de vapor, constituye una base valiosa para ajustar calendarios de riego, programar

aplicaciones fitosanitarias y respaldar otras decisiones operativas en función de la variabilidad espacio-temporal del ambiente agrícola.

Figura 2. *Imágenes de sensores de Humedad del suelo y humedad relativa*



Fuente: Modificado de Hinotek. (2025).

Entre los sensores directos (ver figura 3) de mayor difusión en AP destacan las plataformas ópticas GreenSeeker, ampliamente reconocidas por su capacidad para realizar mediciones activas de reflectancia en las bandas roja y del infrarrojo cercano, lo que permite estimar el estado del cultivo y apoyar decisiones de fertilización nitrogenada en tiempo real. Franzen y Bu (2022) indicaron que este sensor opera con longitudes de onda aproximadas de 660 nm en el rojo y 770 nm en el infrarrojo cercano, mientras que Raun et al. (2002) demostraron que los sensores ópticos activos pueden mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno en cereales cuando se integran a esquemas de aplicación variable. En la misma línea, Mulla (2013) resaltó que los sensores terrestres activos han fortalecido el monitoreo en tiempo real del cultivo y han ampliado la capacidad operativa de la AP.

Figura 3. *Imagen de sensor de N P K en suelos*



Fuente: Modificado de JXCT. (2026).

Por su parte, los sistemas Veris 3100 y 3150 se han consolidado como referentes en la medición de conductividad eléctrica aparente del suelo, debido a que emplean electrodos de contacto montados sobre discos y permiten obtener lecturas simultáneas de ECa asociadas a diferentes profundidades relativas del perfil. Sudduth et al. (2010) señalaron que estos equipos utilizan seis discos rodantes como electrodos y generan dos mediciones simultáneas de conductividad aparente, lo que los hace especialmente útiles para delinear zonas de manejo y reconocer variaciones ligadas a textura, contenido de agua y contraste entre horizontes. De manera complementaria, Kitchen, Drummond, Lund, Sudduth y Buchleiter (2003) mostraron que la ECa y la topografía pueden relacionarse con la variabilidad del rendimiento, reforzando el valor agronómico de estos sensores dentro del diagnóstico intralote.

En el monitoreo hídrico del suelo también sobresalen sensores como el 5TE y las sondas de perfil Drill & Drop. El manual técnico de METER Group (2018) indica que el 5TE está diseñado para medir contenido volumétrico de agua, temperatura y conductividad eléctrica del suelo NPK (ver imgen 3), utilizando una señal de 70 MHz para estimar la permitividad dieléctrica del medio. A su vez, Sentek Technologies (2026) señala que las sondas Drill

& Drop pueden instalarse a diferentes profundidades del perfil y ofrecen lecturas cada 10 cm de humedad, temperatura y, de manera opcional, salinidad, lo que mejora el seguimiento multihorizonte del agua disponible en el suelo. Este tipo de sensores ha fortalecido los programas de riego tecnificado, dado que, como explicó Jones (2004), la programación del riego basada en sensores permite ajustar las decisiones al estado real del sistema suelo-planta y evitar aplicaciones hídricas innecesarias.

Asimismo, los electrodos selectivos de iones han ganado relevancia como herramientas para diagnósticos nutricionales rápidos y georreferenciados. Adamchuk, Hummel, Morgan y Upadhyaya (2004) señalaron que estos dispositivos ofrecen potencial para la medición en movimiento de propiedades químicas del suelo, mientras que Sethuramasamyraja et al. (2007) mostraron que la metodología basada en electrodos selectivos puede emplearse para el mapeo integrado de pH, nitrato y potasio. En conjunto, la integración de sensores ópticos, electromagnéticos, capacitivos y electroquímicos en vehículos, equipos de aplicación y plataformas de monitoreo en tiempo real ha incrementado la resolución espacial del diagnóstico agronómico y ha reducido la incertidumbre asociada al manejo de la heterogeneidad intralote.

En términos aplicados, los sensores ópticos activos han sido utilizados para delimitar sectores con deficiencia nitrogenada y apoyar aplicaciones variables de fertilizante en trigo y maíz. Raun et al. (2002) documentaron mejoras en la eficiencia del uso del nitrógeno en cereales con este enfoque, y Bragagnolo et al. (2013) encontraron en maíz que el índice de vegetación medido por sensor óptico se relacionó estrechamente con biomasa, absorción de nitrógeno y lectura SPAD, confirmando su utilidad para el diagnóstico nutricional. De manera similar, el uso continuo de sondas capacitivas y sensores de perfil ha mejorado el soporte técnico para riego localizado en cultivos de alto valor, mientras que la cartografía de ECa ha facilitado la delimitación de ambientes productivos contrastantes y la toma de decisiones sobre densidad de manejo, fertilización y muestreo.

En agroecosistemas tropicales como café y cacao, la adopción de sensores directos se ha orientado principalmente al monitoreo continuo del agua en el suelo, al diagnóstico rápido de variables químicas en la solución del suelo y al seguimiento del estrés hídrico en planta. En este sentido, Fraga Junior et al. (2021) mostraron la importancia de las condiciones de humedad del suelo para la respuesta hídrica del cacao, mientras que Craparo et al. (2017) evidenciaron que la termografía infrarroja puede emplearse para analizar con rapidez la fisiología del café y su relación con la conductancia estomática bajo diferentes condiciones ambientales. A su vez, McCole et al. (2023) señalaron que los sistemas portátiles de detección in situ de pH y potasio representan una alternativa prometedora para el diagnóstico rápido en campo, especialmente cuando se busca reducir la dependencia de análisis convencionales de laboratorio. La articulación de estos flujos de datos con plataformas de agricultura digital y con herramientas de analítica avanzada amplía su valor predictivo y fortalece la transición hacia sistemas productivos más inteligentes, resilientes y ambientalmente responsables.

La evolución reciente de estos sistemas incluye redes de microsensores capaces de registrar variables microclimáticas, humedad del suelo, estado nutricional y otros indicadores del sistema suelo-planta-atmósfera en intervalos cortos y con transmisión remota. Como señalaron Fuentes-Peñailillo et al. (2024), la digitalización agrícola actual se apoya cada vez más en la integración entre sensores, IoT, teledetección e inteligencia artificial para construir esquemas de monitoreo continuo y toma de decisiones en tiempo real. En esa misma lógica, Oksanen (2005) explicó que la norma ISO 11783 surgió precisamente para estandarizar la comunicación entre tractores, implementos, sensores y unidades de control, favoreciendo la compatibilidad e interoperabilidad entre componentes de distintos fabricantes. De esta manera, la AP avanza hacia infraestructuras escalables de monitoreo, intercambio de datos y automatización operativa con mayor capacidad de respuesta frente a la variabilidad del campo.

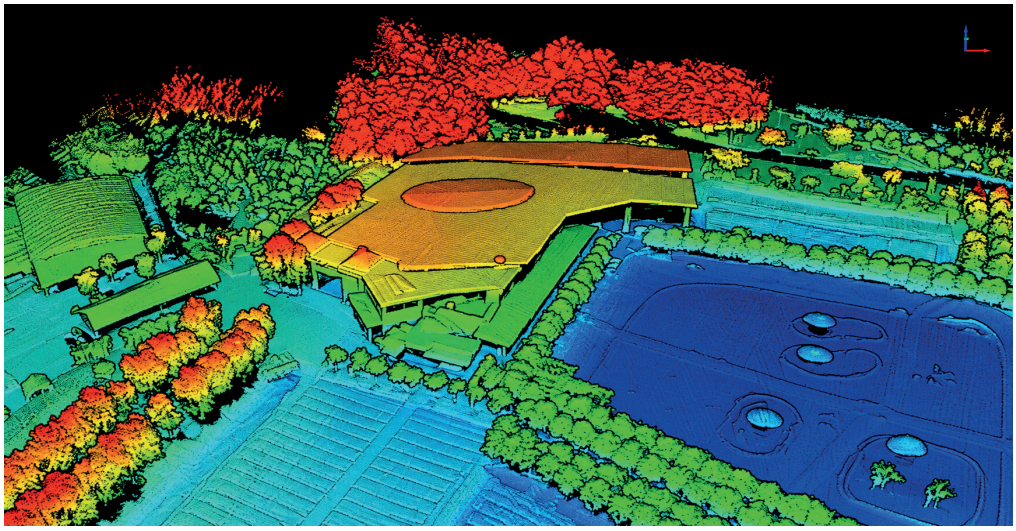
En conjunto, los sensores directos son piezas fundamentales dentro del engranaje de la AP, porque permiten captar datos confiables, continuos y altamente localizados del entorno agrícola. Adamchuk, Hummel, Morgan

y Upadhyaya (2004) resaltaron que el valor de estos sistemas radica en incrementar la densidad de observaciones útiles para el manejo por sitio específico, mientras que Fuentes-Peñailillo et al. (2024) subrayaron que su integración con IoT, sensores remotos y analítica avanzada está redefiniendo el manejo inteligente de cultivos. En consecuencia, la innovación en este campo apunta a sensores cada vez más precisos, accesibles y capaces de medir variables complejas directamente en campo, convirtiéndose en aliados estratégicos para enfrentar los retos productivos, climáticos y ambientales de la agricultura del siglo XXI.

1.2 Sensores remotos

Los sensores remotos han consolidado su protagonismo en la AP debido a su capacidad para cubrir superficies mucho mayores que los sensores de contacto y para generar información multiespectral, térmica e incluso hiperespectral sin interacción física con el cultivo o el suelo como se referencia en la figura x por tenologia lidar (ver figura 4)

Figura 4. *Imagen generada por Dron con cámara multiespectral, tecnología LIDAR*



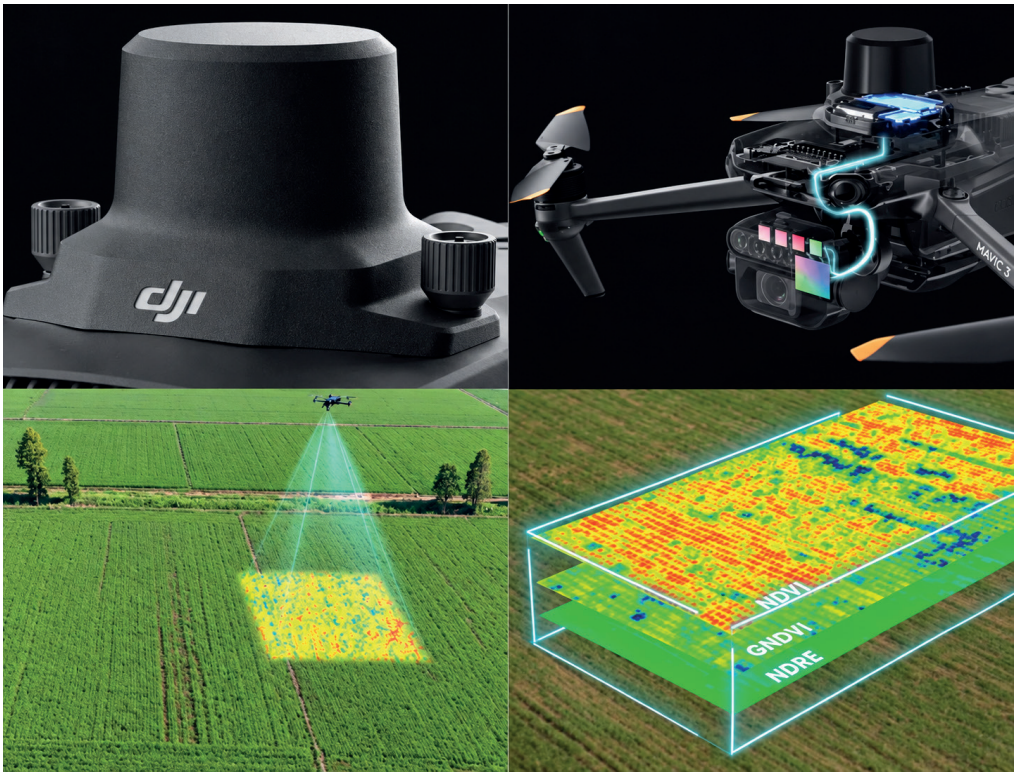
Fuente: Modificado de DJI Enterprise, (2024)

Sishodia, Ray y Singh (2020) destacaron que estas tecnologías se han convertido en herramientas centrales para el monitoreo de cultivos, la gestión del riego, la fertilización y la estimación del rendimiento, mientras que Mulla (2013) señaló que la teledetección ha sido una de las áreas con mayores avances dentro de la AP. Estos sensores pueden instalarse en satélites, aeronaves o drones, y su utilidad agronómica radica en que registran la respuesta espectral del cultivo en bandas del visible, el infrarrojo cercano y, en plataformas como Sentinel-2, también en bandas red-edge y SWIR especialmente valiosas para el análisis de la condición vegetal y del contenido de agua.

A partir de estas bandas se construyen índices espectrales que permiten describir la condición fisiológica del cultivo y la heterogeneidad intralote. Tucker (1979) formuló el NDVI como una razón normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, y desde entonces este índice se ha consolidado como uno de los indicadores más empleados para estimar biomasa verde, vigor y cobertura foliar. Su valor agronómico radica en que permite detectar diferencias espaciales en el desarrollo del cultivo y delimitar ambientes productivos con comportamiento contrastante. Por ello, el NDVI sigue siendo una herramienta de referencia para el monitoreo del crecimiento y la variabilidad espacial en numerosos sistemas agrícolas.

La evolución posterior de la teledetección agrícola (ver figura 5) incorporó índices más sensibles a procesos fisiológicos concretos. En este contexto, Aranguren, Castellón y Aizpurua (2020) mostraron que el NDRE presenta una alta capacidad para estimar el estado nitrogenado del cultivo, precisamente porque sustituye la banda roja por la región red-edge, más sensible a cambios en clorofila y nutrición nitrogenada que el NDVI en coberturas densas. De forma complementaria, Gao (1996) propuso el NDWI para estimar el contenido de agua líquida en la vegetación a partir de bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta, lo que abrió una vía particularmente útil para el seguimiento del estado hídrico del dosel. En términos aplicados, estos índices permiten anticipar síntomas de estrés, ajustar decisiones de fertilización y riego, y reforzar la interpretación espacial del cultivo antes de que las alteraciones sean visibles en campo.

Figura 5. *Sensor remoto – Dron con cámara multiespectral*



Fuente: Modificado de DJI. (2025).

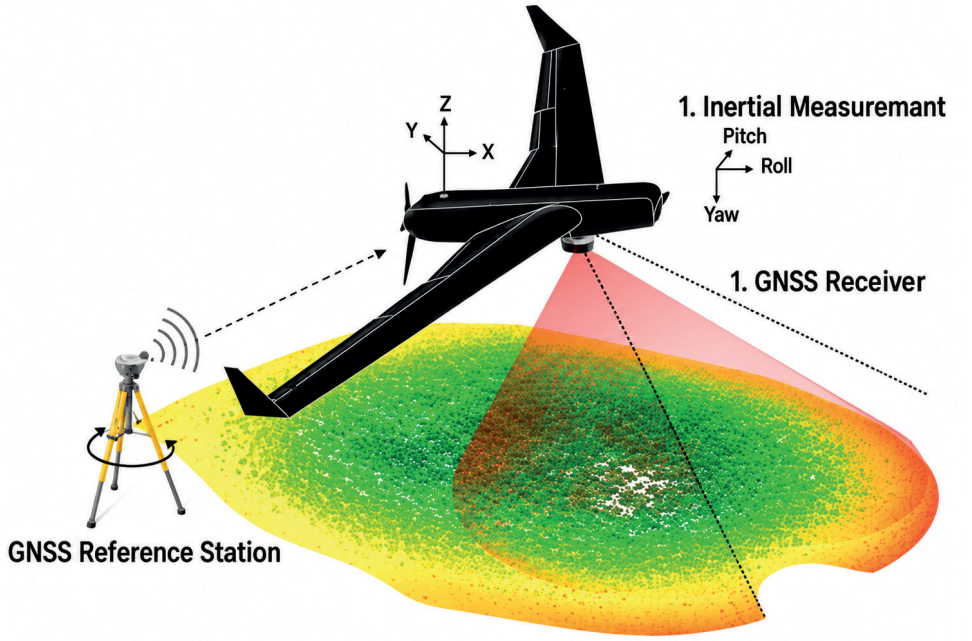
La termografía remota utiliza cámaras que operan, de forma general, en la ventana térmica de 8–14 µm para estimar la temperatura del dosel o de la superficie foliar, variable estrechamente relacionada con la transpiración y con el estado hídrico del cultivo. En este campo, McCutchan y Shackel (1992) demostraron tempranamente que la temperatura y el estado hídrico vegetal podían emplearse como indicadores sensibles del estrés en frutales, mientras que García-Tejero et al. (2018) y Gutiérrez-Gordillo et al. (2020) confirmaron, específicamente en almendro, que la termografía infrarroja permite definir líneas base de no estrés hídrico y apoyar estrategias de riego deficitario con mayor precisión. En términos agronómicos, esta tecnología permite anticipar desbalances hídricos, optimizar la programación del riego

y mejorar la eficiencia en el uso del agua sin depender exclusivamente de evaluaciones destructivas o de baja frecuencia temporal.

Por su parte, las plataformas hiperespectrales aportan firmas espectrales continuas y de alta resolución, normalmente distribuidas entre el visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, lo que amplía notablemente la capacidad para estimar variables bioquímicas del cultivo mediante modelos multivariados. En este sentido, Thenkabail, Lyon y Huete (2018) explicaron que los sensores hiperespectrales agrícolas suelen trabajar con resoluciones espectrales finas en los rangos VNIR y SWIR, lo que favorece el uso de regresiones por mínimos cuadrados parciales para estimar nutrientes, pigmentos y otros compuestos de interés fisiológico. De manera complementaria, Dung et al. (2023) mostraron que la imagen hiperespectral puede emplearse para predecir concentraciones de macronutrientes en tejidos vegetales con modelos PLSR, reforzando su valor para el monitoreo nutricional no destructivo.

Complementariamente, la tecnología LiDAR emite pulsos láser como se referencia su funcionamiento en la figura 6, trabaja comúnmente en longitudes de onda cercanas a 905 o 1064 nm en múltiples aplicaciones terrestres y móviles, y registra la nube de retornos para reconstruir con alta precisión la geometría tridimensional del cultivo o de la vegetación. Como señalaron Rosell y Sanz (2012), esta tecnología ha transformado la caracterización geométrica de cultivos perennes al permitir estimar altura, volumen de copa, porosidad y distribución espacial de la biomasa. En la misma línea, Walter et al. (2019) demostraron que LiDAR puede generar mediciones no destructivas y repetibles de altura de dosel y biomasa aérea, mientras que Farhan et al. (2024) destacaron que su aplicación en AP se ha expandido para el análisis estructural del cultivo, la estimación de biomasa y la delimitación de variabilidad espacial. Por ello, estas métricas tridimensionales resultan especialmente valiosas para alimentar modelos de crecimiento y apoyar decisiones de manejo en cultivos perennes, frutales y parcelas forestales.

Figura 6. *Funcionamiento de la tecnología LIDAR*



Fuente: Modificado de Marek9134. (2012).

El proceso de selección de un sensor remoto debe definirse en función de la escala de análisis (supraparcelaria, parcelaria o subparcela), la resolución temporal requerida por ejemplo, en periodos fenológicos críticos con ventanas de observación de dos a cuatro días y el objetivo agronómico específico, ya sea el diagnóstico nitrogenado, el monitoreo hídrico, el seguimiento de enfermedades o la estimación del rendimiento. En este contexto, el equilibrio entre la granularidad espacial, la frecuencia de captura y el costo operativo condiciona la elección entre vuelos con dron multiespectral y GSD de 5 cm, vuelos tripulados con cámaras como MicaSense Altum a escalas cercanas a 0,5 m, o misiones satelitales de resolución media cercanas a 10 m, cuya utilidad depende de la periodicidad de revisita y del tipo de cultivo evaluado, como señalan Zhang et al. (2002) y Mulla (2013).

En la práctica, la integración de sensores directos y remotos configura un enfoque híbrido de alto valor agronómico. Así, los datos puntuales obtenidos con sensores de humedad tipo Decagon, instalados cada 20 cm en la rizosfera, pueden emplearse para calibrar simulaciones de evapotranspiración derivadas de índices como el NDVI; de igual manera, los mapas de conductividad eléctrica aparente generados con equipos como Veris 3150 permiten estratificar el muestreo foliar y fortalecer modelos hiperespectrales; además, las bandas térmicas de resolución media pueden refinarse mediante procedimientos de downscaling apoyados en información de drones, con el fin de identificar con mayor precisión islas de estrés hídrico dentro del lote. Este tipo de integración mejora la capacidad diagnóstica y fortalece la toma de decisiones sitio-específicas, en concordancia con lo planteado por Gebbers y Adamchuk (2010) y Mulla (2013).

La interpretación agronómica de los productos derivados se apoya en sistemas de información geográfica. Herramientas de escritorio y plataformas en la nube, como QGIS, Pix4D Mapper, Climate FieldView y otros motores analíticos, permiten integrar capas de NDVI, NDRE, mapas de ECa y curvas de retención hídrica con límites de lote, franjas de manejo e históricos de rendimiento. Esta articulación facilita la generación de mapas de prescripción de fertilización en formatos como shapefile o ISO-XML y consolida un flujo de trabajo orientado al manejo diferenciado del cultivo, tal como ha sido discutido en la literatura sobre AP, seguridad alimentaria y conservación de precisión por Stafford (2000), Gebbers y Adamchuk (2010) y Delgado et al. (2011).

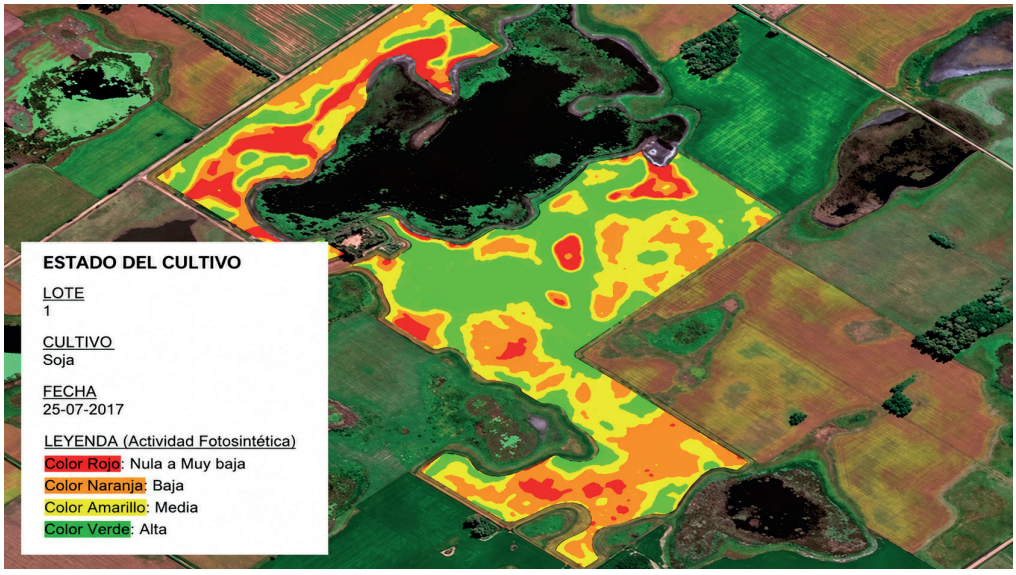
2. Monitoreo en tiempo real del crecimiento y la salud del cultivo

El monitoreo en tiempo real del crecimiento y la salud del cultivo, como componente esencial de la AP, puede definirse como la recopilación continua, automatizada y georreferenciada de variables fisiológicas, morfológicas y ambientales de las plantas a lo largo de su ciclo fenológico. Su propósito central es detectar oportunamente variaciones espaciales y

temporales en el desarrollo vegetal, con el fin de optimizar las decisiones agronómicas y elevar la eficiencia en el uso de los recursos productivos. En este sentido, Pierce y Nowak (1999), Zhang et al. (2002), Gebbers y Adamchuk (2010) y Mulla (2013) coinciden en que la implementación de este tipo de monitoreo depende de la integración sinérgica de sensores remotos, sensores in situ, sistemas de posicionamiento global, sistemas de información geográfica, vehículos aéreos no tripulados, sistemas expertos y modelos predictivos capaces de interpretar en tiempo casi real el estado fisiológico del cultivo y anticipar eventos de estrés biótico y abiótico.

Desde una perspectiva histórica, el monitoreo del estado de los cultivos ha evolucionado desde observaciones visuales y subjetivas realizadas por el productor hacia métodos instrumentales de alta precisión (ver figura 7). Esta transición ha sido impulsada por la necesidad de incrementar la productividad agrícola de manera sostenible y, al mismo tiempo, reducir los impactos ambientales asociados al manejo convencional. Un hito temprano en esta evolución fue el uso de la reflectancia espectral de la vegetación a partir de trabajos como el de Tucker (1979), mientras que durante la década de 1990 la consolidación del enfoque de AP permitió integrar estos datos con tecnologías GPS y SIG para cartografiar la variabilidad intra-parcelaria y ajustar la aplicación diferenciada de insumos, como explicó Stafford (2000). Más recientemente, la incorporación de sensores multiespectrales y térmicos en drones, la automatización de estaciones meteorológicas y la expansión del Internet de las Cosas han fortalecido el monitoreo en tiempo real y la agricultura digital, como destacan Shamshiri et al. (2018). A su vez, esta evolución tecnológica ha favorecido enfoques orientados a la conservación y a la sostenibilidad, en los que la salud del suelo, la reducción del impacto ambiental y la resiliencia de los agroecosistemas ocupan un lugar central, tal como señalan Abit et al. (2018), Berry et al. (2003) y Delgado et al. (2011)(ver figura 7).

Figura 7. *Monitoreo en tiempo real del crecimiento y salud del cultivo*



Fuente: Modificado de Agrotendencia (2025).

Las metodologías de monitoreo en tiempo real pueden agruparse en tres categorías principales: sensores remotos, que operan mediante plataformas aéreas y satelitales; sensores de proximidad; y sensores in situ, los cuales establecen contacto directo con la planta o el suelo. En el caso de los sensores remotos, sobresalen plataformas satelitales como Sentinel-2, Landsat 8 y MODIS, capaces de suministrar información relevante sobre el vigor vegetativo mediante índices espectrales estandarizados, entre ellos el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación mejorado (EVI) y los índices asociados al borde rojo, como el NDRE. Estos indicadores han sido ampliamente utilizados para evaluar biomasa, actividad fotosintética, contenido de clorofila y respuesta del cultivo frente a condiciones de estrés, como lo documentan Huete et al. (2002) y Zarco-Tejada et al. (2013).

Aunque estas herramientas permiten analizar extensas superficies agrícolas, presentan limitaciones asociadas principalmente con la resolución espacial, la frecuencia de adquisición y la interferencia atmosférica, en especial bajo condiciones de nubosidad. En contraste, los sensores montados en UAV o drones permiten adquirir imágenes con resoluciones de pocos centímetros por píxel, lo que facilita la identificación temprana de anomalías específicas como clorosis, estrés hídrico o daños causados por plagas y arvenses. Esta capacidad de detección temprana y de observación detallada a escala intra-parcelaria ha sido demostrada en estudios con imágenes RGB y multiespectrales obtenidas desde UAV, como el de Peña et al. (2015).

De manera complementaria, los sensores de proximidad (ver figura 8), como GreenSeeker y Crop Circle, permiten medir en campo la reflectancia del dosel vegetal mediante fuentes de luz activa, por lo que no dependen estrictamente de la radiación solar incidente y resultan especialmente útiles en ambientes con alta heterogeneidad espacial. Además, este tipo de sensores ha mostrado utilidad para el monitoreo rápido del estado nutricional y para el ajuste de estrategias de fertilización variable en tiempo real, como señalan Cao et al. (2018) y Lu et al. (2020).

Figura 8. *Sensor de proximidad Greenseeker*



Fuente: Modificado de PTx Trimble, (2024).

Por otra parte, los sensores in situ comprenden una amplia gama de dispositivos, entre ellos tensiómetros, sensores capacitivos para la medición de la humedad del suelo, sensores de temperatura foliar, sensores de flujo de savia, medidores portátiles de clorofila (ver figura 9) y otros instrumentos orientados a cuantificar variables fisiológicas como la fotosíntesis, la conductancia estomática y el estado hídrico de la planta. Su valor agronómico radica en que permiten evaluar de forma directa la respuesta del cultivo frente a cambios en la disponibilidad de agua y en el ambiente de crecimiento, tal como expone Jones (2004) en su revisión sobre métodos basados en planta para el seguimiento del estado hídrico y la programación del riego.

La principal ventaja de estos sensores reside en su contacto directo con la planta o el suelo, lo que favorece un monitoreo continuo y de alta precisión. Sin embargo, su uso suele presentar limitaciones en términos de cobertura espacial, especialmente cuando se busca representar la variabilidad de lotes extensos. En las últimas décadas, ha cobrado creciente importancia la integración de estas plataformas con herramientas digitales avanzadas, tales como sistemas de gestión de información agrícola, algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales artificiales, capaces de identificar patrones anómalos y anticipar eventos futuros a partir del análisis de series temporales multiescalares. Esta convergencia entre sensado y analítica digital ha sido ampliamente reconocida en revisiones recientes sobre inteligencia artificial aplicada a la agricultura, como la de Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018).

En la actualidad, entre las tecnologías más utilizadas para el monitoreo en tiempo real en agricultura se encuentran los UAV equipados con cámaras multiespectrales y térmicas, los sensores de clorofila tipo SPAD, las estaciones agroclimáticas automatizadas, los sensores de humedad y temperatura del suelo conectados a plataformas IoT y el análisis de imágenes satelitales mediante entornos de procesamiento como Google Earth Engine. En numerosos casos, estas herramientas se complementan con modelos de simulación del crecimiento y desarrollo del cultivo, como DSSAT, AquaCrop

y APSIM, los cuales permiten contrastar el comportamiento observado en campo con escenarios proyectados y, de este modo, generar alertas tempranas frente a desviaciones fenológicas, estrés hídrico o deficiencias nutricionales. La relevancia de estos modelos ha sido documentada para DSSAT por Jones et al. (2003), para AquaCrop por Steduto et al. (2009) y para APSIM por Holzworth et al. (2014).

Figura 9. *Sensor de clorofila tipo SPAD*

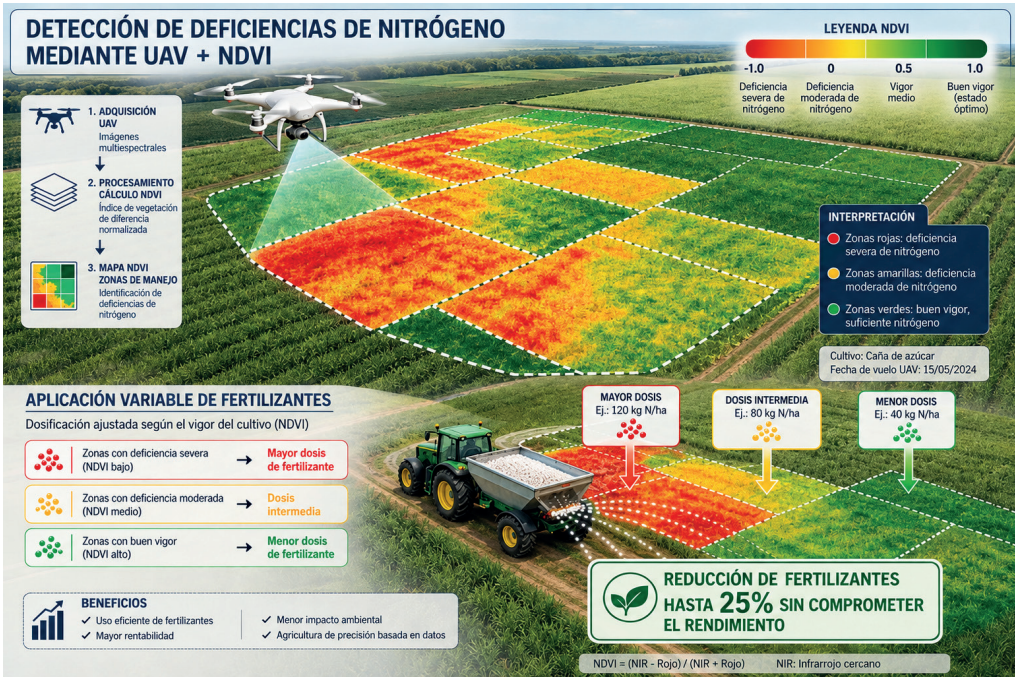


Fuente: Modificado de Falker, (2025).

Un ejemplo concreto de aplicación de estas tecnologías se observa en el uso de UAVs en cultivos de caña de azúcar, donde las imágenes multiespectrales y los índices de vegetación, como el NDVI, se han empleado para estimar biomasa, estado nutricional y variabilidad espacial del cultivo, facilitando la definición de estrategias de fertilización más ajustadas a la heterogeneidad del lote (ver figura 10). De forma similar, en viticultura de precisión, los sensores térmicos e infrarrojos han permitido detectar

diferencias espaciales en el estado hídrico de la vid y activar esquemas de riego con base en umbrales fisiológicos, mejorando la oportunidad de la intervención agronómica. Para cultivos extensivos como maíz y soya, la integración de estaciones meteorológicas, sensores de humedad del suelo y plataformas digitales ha fortalecido la programación del riego en función de la demanda hídrica real, con efectos positivos sobre la eficiencia en el uso del agua, especialmente en regiones semiáridas, como muestran Amarasingam et al. (2022), Bellvert et al. (2014) y Evett et al. (2012).

Figura 10. *Mapa NDVI para la detección de deficiencias de nitrógeno y la aplicación variable de fertilizantes en caña de azúcar*



Fuente: Elaboración propia generada por IA.

La rentabilidad de estas prácticas también ha sido documentada en la literatura especializada. En términos generales, la AP tiende a mejorar la eficiencia operativa, reducir pérdidas de insumos y fortalecer la toma de

decisiones sitio-específica, aunque los beneficios económicos dependen de variables como el tamaño del predio, la variabilidad espacial, los costos de implementación y la capacidad de gestión del productor. En este sentido, Balafoutis et al. (2017) destacan beneficios simultáneos sobre productividad, economía y mitigación ambiental, mientras que Schimmelpfennig (2016) muestra que algunas tecnologías, como la dosificación variable, pueden elevar la rentabilidad en sistemas agrícolas tecnificados. Aunque la adopción ha sido más temprana y extendida en Estados Unidos y otros sistemas agrícolas de alta tecnificación, su potencial en contextos como el colombiano sigue siendo amplio, sobre todo por su utilidad para optimizar la relación cultivo-ambiente y mejorar el uso de recursos.

3. Interpretación de índices de vegetación en agricultura de precisión

La interpretación de los índices de vegetación constituye una herramienta central en la AP, debido a que permite evaluar biomasa, vigor, estado sanitario y niveles de estrés hídrico o nutricional a partir del análisis cuantitativo de la radiación reflejada por la vegetación. Su fundamento biofísico radica en el comportamiento diferencial de la reflectancia en bandas como el rojo y el infrarrojo cercano, cuya respuesta varía de acuerdo con la estructura foliar, la concentración de clorofila y el contenido de agua en los tejidos vegetales. A partir de esta relación espectral, es posible derivar indicadores asociados con crecimiento, índice de área foliar, cobertura vegetal y potencial productivo, lo que convierte a los índices de vegetación en sensores indirectos de gran utilidad para el monitoreo agronómico. Esta interpretación se sustenta en aportes clásicos como los de Baret y Guyot (1991) y en desarrollos posteriores orientados al análisis de clorofila y de rasgos biofísicos del cultivo, como los de Gitelson (2004).

Desde una perspectiva histórica, el desarrollo de los índices de vegetación se remonta a la década de 1970, cuando Rouse et al. (1974) propusieron el NDVI en el contexto de los programas de observación terrestre de la NASA. Posteriormente, y a medida que avanzaron la

teledetección y la AP, surgieron índices orientados a corregir o reducir algunas limitaciones del NDVI, como su sensibilidad al fondo del suelo, su saturación en coberturas densas y la influencia atmosférica. Entre estos desarrollos se destacan el SAVI de Huete (1988), el EVI de Huete et al. (2002), el WDRVI de Gitelson (2004) y variantes asociadas al uso de la banda verde, como las propuestas por Gitelson et al. (1996). En conjunto, estos avances ampliaron la capacidad de los índices para caracterizar el estado fisiológico de la vegetación y consolidaron su uso en esquemas de monitoreo espacialmente diferenciado.

En la práctica, los índices de vegetación pueden calcularse a partir de imágenes capturadas por satélites, aeronaves tripuladas, vehículos terrestres y UAVs, y posteriormente procesarse en plataformas especializadas para generar mapas de variabilidad intra-predial. En este flujo de trabajo se integran cámaras multiespectrales, hiperespectrales y, en determinados casos, sensores térmicos que permiten complementar la información espectral con la temperatura del dosel. Asimismo, los sensores proximales, como los espectrorradiómetros portátiles, cumplen un papel relevante en la validación en campo y en la calibración de modelos derivados de teledetección. En este contexto, la literatura sobre termografía y monitoreo fisiológico, como la de Jones et al. (2009), ha sido especialmente importante para articular la respuesta espectral y térmica con variables funcionales del cultivo.

En la actualidad agrícola, los índices de vegetación de mayor recurrencia y aplicación son los siguientes: (ver tabla 1).

Tabla 1. *Principales índices de vegetación utilizados en AP*

Ítem	Índice de vegetación	Fórmula	Aplicación principal	Interpretación o ventaja
1	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	(NIR – RED) / (NIR + RED)	Estimación del vigor y la biomasa de la vegetación	Es el índice más utilizado. Sus valores varían entre -1 y +1, donde los valores cercanos a +1 indican vegetación densa y saludable, y los cercanos a -1 superficies sin vegetación.
2	EVI (Enhanced Vegetation Index)	G * (NIR – RED) / (NIR + C1 * RED – C2 * BLUE + L)	Evaluación de coberturas vegetales densas	Presenta mayor sensibilidad en vegetación densa y menor influencia de la atmósfera y del fondo del suelo.
3	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	(1 + L) * (NIR – RED) / (NIR + RED + L)	Análisis de cultivos con alta exposición de suelo	Reduce la influencia del suelo desnudo sobre la señal espectral, mejorando la estimación de la vegetación.
4	GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	(NIR – GREEN) / (NIR + GREEN)	Detección temprana de estrés hídrico o deficiencias nutricionales	Es útil para identificar alteraciones fisiológicas antes de que sean visibles a simple vista.
5	NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)	(NIR – REDEDGE) / (NIR + REDEDGE)	Monitoreo de cultivos en estados avanzados de desarrollo	Resulta más eficiente cuando el NDVI se satura por alta densidad de biomasa.
6	VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)	(GREEN – RED) / (GREEN + RED – BLUE)	Evaluación de vegetación con imágenes RGB	Es útil en drones o plataformas que no cuentan con cámaras multiespectrales.

Ítem	Índice de vegetación	Fórmula	Aplicación principal	Interpretación o ventaja
7	MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index 2)	Variable según parametrización espectral	Estimación de clorofila y respuesta fotosintética	Permite evaluar con mayor detalle el contenido de clorofila y el comportamiento fisiológico de la vegetación.
8	MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index)	Variable según parametrización espectral	Cuantificación de clorofila y eficiencia fotosintética	Está orientado al análisis de la absorción de clorofila y al estado funcional del cultivo.

Fuente: Esta investigacion

Los índices de vegetación encuentran una amplia gama de aplicaciones en la AP (ver tabla 2)

Tabla 2. *Principales aplicaciones de los índices de vegetación en la AP*

Ítem	Aplicación	Descripción	Utilidad en AP
1	Monitoreo fenológico	Permite identificar con precisión las fases de desarrollo del cultivo, facilitando el seguimiento de su dinámica temporal, como señalan Clevers et al. (2012).	Ayuda a optimizar las fechas de siembra, manejo agronómico y cosecha según el estado fenológico del cultivo.
2	Diagnóstico de estrés hídrico o nutricional	La disminución en los valores de índices como NDVI o GNDVI puede revelar de manera temprana la presencia de estrés hídrico o deficiencias nutricionales, incluso antes de observar síntomas visibles, de acuerdo con Mulla (2013).	Permite tomar decisiones preventivas y oportunas para corregir limitaciones hídricas o nutricionales del cultivo.
3	Aplicaciones variables de insumos	La generación de mapas de prescripción a partir de índices como NDVI o SAVI permite ajustar espacialmente la aplicación de fertilizantes y agua, como indican Basso et al. (2016).	Favorece el uso eficiente de insumos, reduce costos operativos y disminuye impactos ambientales.
4	Identificación de malezas o plagas	El contraste espectral entre el cultivo y la vegetación no deseada o áreas afectadas facilita la detección localizada de infestaciones, según Lamb et al. (2008).	Mejora la precisión en el control de malezas y plagas, permitiendo intervenciones focalizadas.
5	Estimación de rendimiento	A partir de relaciones entre índices como NDVI o EVI y variables como biomasa o productividad, es posible proyectar el rendimiento del cultivo, como reportan Tucker et al. (2005).	Facilita la elaboración de modelos predictivos para anticipar la producción y apoyar la planificación de cosecha.

Ítem	Aplicación	Descripción	Utilidad en AP
6	Detección de anomalías intra-parcela	La variabilidad espacial de los índices de vegetación permite reconocer sectores con bajo desempeño productivo o comportamiento atípico, tal como lo plantean Zarco-Tejada et al. (2014).	Permite implementar acciones correctivas localizadas, mejorando la eficiencia del manejo dentro de la parcela.

Fuente: Esta investigación

Por ejemplo, en maíz, Li et al. (2022) demostraron que los índices de vegetación derivados de PlanetScope y Sentinel-2 permiten predecir el rendimiento en campaña, mientras que Jang et al. (2024) señalaron que el NDVI mejora su capacidad predictiva cuando se combina con NDRE y GNDVI. En viticultura, Bellvert et al. (2014) evidenciaron que la teledetección térmica desde UAV permite delimitar con precisión la variabilidad espacial del estrés hídrico y apoyar decisiones de riego de precisión. De forma similar, Inoue et al. (2008) mostraron en arroz que los índices espectrales normalizados son útiles para estimar variables fotosintéticas y el estado nitrogenado del dosel, mientras que Duarte-Carvajalino et al. (2021) destacaron, en cacao, el potencial de las imágenes digitales y el aprendizaje automático para caracterizar atributos del dosel. En conjunto, estos trabajos confirman que la información espectral se ha convertido en un insumo estratégico para la AP, tal como también sostienen Delgado et al. (2011), al facilitar intervenciones más eficientes y ajustadas a la variabilidad del cultivo.

El monitoreo de cultivos mediante sensores se ha consolidado como uno de los pilares de la AP, porque, como explica Mulla (2013), ha permitido pasar de observaciones generales del lote a diagnósticos espaciales y temporales mucho más detallados. En este contexto, los sensores directos y los sensores remotos no deben entenderse como tecnologías excluyentes, sino como herramientas complementarias. Según Jones (2004), los sensores directos ofrecen mediciones localizadas y de alta precisión sobre variables

como el estado hídrico de la planta o del suelo, mientras que Mulla (2013) resalta que los sensores remotos aportan una visión espacial amplia y continua del comportamiento del cultivo. Esta complementariedad fortalece la capacidad diagnóstica del sistema de monitoreo y mejora la interpretación agronómica del lote.

Desde esta perspectiva, Jones (2004) subraya que los sensores directos son especialmente valiosos para caracterizar microambientes agronómicos y validar condiciones específicas en tiempo real, particularmente en procesos como la programación del riego. Por su parte, Mulla (2013) señala que los sensores remotos instalados en drones, aeronaves o satélites permiten detectar patrones espaciales de variabilidad, identificar zonas con estrés hídrico, deficiencias nutricionales o alteraciones sanitarias, y generar mapas útiles para el manejo diferenciado. En consecuencia, Delgado et al. (2011) sostienen que la integración de ambos enfoques en esquemas híbridos incrementa la precisión en la toma de decisiones y favorece sistemas productivos más resilientes, eficientes y coherentes con los principios de la conservación de precisión.

El monitoreo en tiempo real del crecimiento y la salud del cultivo representa, por tanto, una de las transformaciones más relevantes de la agricultura contemporánea. Shamshiri et al. (2018) indican que la articulación entre sensores remotos, sensores de proximidad, sensores in situ, sistemas de posicionamiento global y plataformas digitales ha impulsado la transición desde una agricultura reactiva hacia una agricultura adaptativa y predictiva. En la misma línea, Klerkx et al. (2019) explican que la digitalización agrícola ha ampliado el papel del análisis de datos, el aprendizaje automático y la automatización en la gestión agronómica, permitiendo procesar series temporales y generar alertas tempranas frente a eventos de estrés biótico o abiótico.

En este marco, la interpretación de los índices de vegetación constituye una herramienta de gran valor agronómico. Gitelson (2004) mostró que índices derivados de la reflectancia, como los utilizados para estimar rasgos

biofísicos del dosel, permiten aproximarse al vigor y al desempeño fisiológico de la vegetación. A su vez, Mulla (2013) destaca que índices como NDVI, EVI, SAVI, GNDVI y NDRE se han convertido en indicadores indirectos de biomasa, área foliar, contenido de clorofila y estado de estrés, por lo que resultan útiles para el monitoreo fenológico, el diagnóstico temprano de estrés hídrico o nutricional, la delimitación de zonas de manejo y la estimación del rendimiento potencial. Así, al transformar datos espectrales en información agronómica operativa, estos índices facilitan estrategias de manejo más focalizadas y eficientes.

La adopción sistemática de sensores no solo genera beneficios productivos y económicos, sino también ventajas ambientales relevantes. Finger et al. (2019) sostienen que la AP se ubica en la intersección entre productividad y sostenibilidad, porque el uso más preciso de agua, fertilizantes y otros insumos reduce desperdicios y atenúa costos ambientales. Sin embargo, Klerkx et al. (2019) advierten que su expansión aún enfrenta barreras como los costos iniciales, la brecha digital, la conectividad limitada y la necesidad de capacitación técnica. Por ello, el futuro de esta tecnología dependerá tanto del desarrollo de sensores más precisos y asequibles como de la democratización del acceso y de la consolidación de plataformas que integren información multiescalar de manera útil para el productor.

Síntesis final

Este capítulo permitió establecer que el monitoreo de cultivos mediante sensores constituye uno de los componentes más sólidos y transformadores de la AP, debido a que posibilita observar el agroecosistema con un nivel de detalle espacial, temporal y fisiológico que supera ampliamente la evaluación visual convencional. En este contexto, Mulla (2013) señala que la teledetección ha redefinido la forma en que se interpreta la variabilidad intra-parcelaria, mientras que Jones (2004) demuestra que los sensores directos e in situ aportan información puntual de alta precisión sobre el estado hídrico y fisiológico de las plantas. Por ello, el principal aporte del

capítulo radica en mostrar que los sensores remotos, de proximidad e in situ no deben entenderse como tecnologías aisladas, sino como herramientas complementarias cuya integración fortalece el diagnóstico agronómico y la toma de decisiones.

De igual manera, la interpretación de índices de vegetación se consolidó en este capítulo como una herramienta esencial para traducir la reflectancia espectral en información agronómica útil. Gitelson (2004) mostró que estos índices permiten aproximarse a características biofísicas relevantes del dosel, mientras que Huete et al. (2002) demostraron la importancia de índices mejorados para reducir limitaciones asociadas al suelo y a la atmósfera. En aplicaciones concretas, Bellvert et al. (2014) comprobaron la utilidad de la teledetección térmica en viñedo para el manejo del agua; Inoue et al. (2008) documentaron su valor en arroz para estimar variables fotosintéticas; y Duarte-Carvajalino et al. (2021) destacaron su potencial en cacao para caracterizar atributos de copa y apoyar procesos de monitoreo. En conjunto, estos antecedentes confirman que índices como NDVI, EVI, SAVI, GNDVI y NDRE son instrumentos estratégicos para delimitar zonas de manejo, diagnosticar estrés y orientar aplicaciones variables de insumos.

Finalmente, el capítulo permitió concluir que el uso sistemático de sensores no solo incrementa la eficiencia productiva, sino que también fortalece la sostenibilidad ambiental. Delgado et al. (2011) sostienen que la integración de información espacial y puntual contribuye a una conservación de precisión más efectiva, mientras que Finger et al. (2019) subrayan que la AP se sitúa en la convergencia entre productividad y sostenibilidad. Sin embargo, también se reconoció que persisten barreras asociadas al costo de adopción, la brecha digital, la conectividad y la necesidad de formación técnica, como advierten Klerkx et al. (2019). En consecuencia, la síntesis del capítulo muestra que el futuro de la agricultura dependerá en gran medida de la capacidad para democratizar el acceso a estas tecnologías, mejorar la integración entre sensores, inteligencia artificial e Internet de las Cosas, y adaptar estas herramientas a las realidades productivas de cada territorio. Así, el monitoreo inteligente del cultivo se consolida como

una base indispensable para construir sistemas agrícolas más eficientes, resilientes y sostenibles.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1: Selección y justificación de sensores para un caso de estudio agrícola

Objetivo: Desarrollar la capacidad de seleccionar los tipos de sensores más adecuados para escenarios agrícolas específicos, justificando la elección en función de los objetivos y las limitaciones.

Descripción: Como Ingeniero parte del equipo técnico que asesora a una granja agrícola en el departamento de Nariño, Colombia, que cultiva aguacate (Hass). El agricultor desea implementar tecnologías de monitoreo para optimizar el uso del agua y diagnosticar tempranamente problemas nutricionales en sus árboles. La finca tiene una extensión de 15 hectáreas con topografía ondulada y acceso limitado a internet en algunas zonas remotas. Tu presupuesto es moderado, pero la precisión en el riego y la detección temprana de estrés son prioritarias.

Tareas:

1. **Recomendación de sensores:** Realizar una propuesta de combinaciones de sensores directos y remotos que consideres más apropiadas para los objetivos del agricultor (optimización del riego y diagnóstico nutricional).

2. **Justificación de la elección:** Para cada tipo de sensor recomendado, explica por qué lo eliges, mencionando sus ventajas específicas para el cultivo de aguacate en el contexto de Nariño (topografía, conectividad, objetivos).

3. **Integración de datos:** Describe brevemente cómo se integrarían los datos de los diferentes sensores para ofrecer una visión cohesiva al agricultor. ¿Qué tipo de plataforma o software sería necesario?

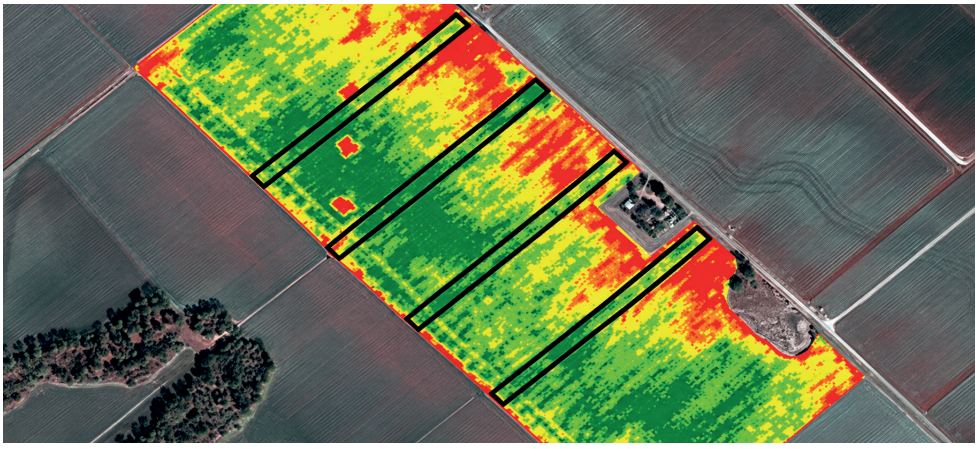
4. **Discusión:** ¿Qué desafíos específicos podrían surgir en la implementación y mantenimiento de estos sensores en esta finca? ¿Cómo abordarías la limitación de conectividad en las zonas remotas?

Ejercicio 2: Análisis e Interpretación de Índices de Vegetación para la Gestión de Fertilización Nitrogenada

Objetivo: Aplicar el conocimiento sobre índices de vegetación para interpretar mapas y proponer estrategias de manejo diferenciado.

Descripción: Se te proporciona un mapa NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (ver figura 11) de un lote de cultivo de maíz en su fase de máximo desarrollo vegetativo. Los valores de NDVI varían de 0.2 (áreas con baja cobertura o estrés) a 0.8 (áreas con alto vigor vegetativo). El agricultor tiene un historial de aplicación uniforme (Sin variabilidad) de fertilizante nitrogenado en todo el campo, y desea implementar una fertilización variable para la próxima campaña.

Figura 11. *Mapa NDVI lote de cultivo de maíz en su fase de máximo desarrollo vegetativo*



Fuentes: Modificado de Rosero Peñafiel, T. A. (2020).

Tareas:

1. **Zonificación del campo:** Con base en el mapa NDVI (imagina zonas con diferentes rangos de valor), divide el campo en al menos tres zonas de manejo diferenciado (ej. alta, media, baja vigorosidad). Describe las características que esperarías de cada zona en términos de salud del cultivo.

2. **Diagnóstico y recomendaciones de N:** Para cada zona identificada, interpreta el significado de los valores de NDVI con relación con la necesidad de N. ¿Qué recomendaciones específicas de fertilización nitrogenada harías para cada zona (ej., aumentar, mantener, reducir la dosis)?

3. **Elección de Índice Alternativo:** Si solo tuvieras acceso a una cámara multiespectral con banda Red Edge (borde rojo), ¿qué índice de vegetación recomendarías usar en lugar del NDVI para este cultivo en esta etapa de desarrollo y por qué?

4. **Discusión:** ¿Qué otros factores (además del NDVI) considerarías para afinar tus recomendaciones de fertilización nitrogenada? ¿Cómo podrías validar la efectividad de la fertilización variable en la próxima campaña?

Ejercicio 3: Diseño de un sistema de monitoreo de estrés hídrico en tiempo real

Objetivo: Diseñar un sistema de monitoreo en tiempo real para un cultivo específico, integrando diferentes tecnologías sensoriales y de comunicación.

Descripción: Una plantación de banano de 80 hectáreas en Guayas, Ecuador, experimenta estrés hídrico recurrente debido a la irregularidad de las lluvias y la ineficiencia en la gestión del riego. El gerente de la plantación quiere implementar un sistema de monitoreo en tiempo

real que le permita tomar decisiones de riego precisas y oportunas. La plantación cuenta con infraestructura de riego por goteo ya instalada.

Tareas:

1. **Componentes del sistema:** Identifica y describe los principales componentes de un sistema de monitoreo de estrés hídrico en tiempo real para esta plantación (incluyendo tipos de sensores, plataformas de datos y métodos de comunicación).

2. **Parámetros a monitorear:** ¿Qué parámetros específicos (además de la humedad del suelo) son cruciales para el monitoreo del estrés hídrico en banano, y qué sensores utilizarías para medirlos? Justifica su importancia.

3. **Flujo de datos y decisión:** Explica el flujo de datos desde la captura por el sensor hasta la toma de decisión por parte del agricultor. ¿Cómo se traduciría la información sensorial en una acción de riego?

4. **Discusión:** ¿Qué ventajas ofrece un sistema de monitoreo en tiempo real en comparación con un muestreo manual o la programación de riego basada en calendario? ¿Qué riesgos de ciberseguridad o privacidad de datos podrían surgir con la implementación de un sistema de monitoreo conectado a la nube?

Ejercicio 4: Evaluación de la viabilidad de sensores Low-Cost vs. Alta Gama para pequeños productores

Objetivo: Analizar la viabilidad económica y técnica de diferentes tecnologías de sensores para pequeños productores, fomentando el pensamiento crítico sobre la democratización de la tecnología.

Descripción: Un grupo de pequeños productores de café en una zona montañosa de Nariño, con parcelas de entre 1 y 5 hectáreas, está

interesado en la AP, pero su presupuesto es muy limitado. Han oído hablar de sensores y drones, pero no saben si son accesibles o útiles para su escala.

Tareas:

1. **Opciones de Monitoreo:** Investiga y presenta al menos dos opciones de tecnologías de monitoreo (una de bajo costo y otra de mayor costo/sofisticación) que podrían ser relevantes para estos pequeños productores de café. Para cada opción, detalla los tipos de sensores y plataformas (si aplica).

2. **Análisis Costo-Beneficio:** Realiza un breve análisis costo-beneficio para cada opción, considerando la inversión inicial, el mantenimiento, la complejidad de uso y los potenciales beneficios (ej., ahorro de insumos, mejora de la productividad).

3. **Adaptación y Escalabilidad:** ¿Cómo se podrían adaptar las tecnologías de mayor costo para hacerlas más accesibles o compartibles entre varios pequeños productores? ¿Qué papel podrían jugar las cooperativas o asociaciones en la adopción de estas tecnologías?

4. **Discusión:** ¿Es justo que las tecnologías de AP sean tan costosas, limitando el acceso a pequeños agricultores? ¿Qué estrategias se pueden implementar para cerrar la brecha tecnológica y promover una AP más equitativa?

Referencias

Abit, M. J. M., Arnall, D. B., & Phillips, S. B. (2018). Environmental implications of precision agriculture. En D. K. Shannon, D. E. Clay, & N. R. Kitchen (Eds.), Precision agriculture basics (pp. 209–220). ASA, CSSA, and SSSA. https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2017.0035

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 44(1), 71–91. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002

Agrotendencia. (2020). Agricultura de precisión: conoce qué es y sus desventajas [Imagen de cartografía del estado del cultivo]. Agropedia. https://agrotendencia.tv/agricultura/agricultura-de-precision/agricultura-de-precision/

Amarasingam, N., Salgadoe, A. S. A., Powell, K., Gonzalez, L. F., & Natarajan, S. (2022). A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 26, 100712. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712

Aranguren, M., Castellón, A., & Aizpurua, A. (2020). Crop sensor based non-destructive estimation of nitrogen nutritional index in wheat using normalized difference red edge. Agriculture, 10(5), 148. https://doi.org/10.3390/agriculture10050148

Arteaga-Ramírez, R., Cervantes-Osornio, R., Vázquez-Peña, M. A., y Ojeda-Bustamante, W. (2017). Estación meteorológica convencional versus automática: Sus diferencias evaluadas con índices estadísticos, Chapingo, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8(6), 1301–1313. https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/296

Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Tsiropoulos, Z., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. Sustainability, 9(8), 1339. https://doi.org/10.3390/su9081339

Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, 35(2–3), 161–173. https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U

Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2016). Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. Science of the Total Environment, 545–546, 227–235. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.104

Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. Precision Agriculture, 15(4), 361–376. https://doi.org/10.1007/s11119-013-9334-5

Berry, J. K., Delgado, J. A., Khosla, R., & Pierce, F. J. (2003). Precision conservation for environmental sustainability. Journal of Soil and Water Conservation, 58(6), 332–339.

Bragagnolo, J., Amado, T. J. C., Nicoloso, R. S., Jasper, J., Kunz, J., & Teixeira, T. G. (2013). Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37(5), 1288–1298. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500018

Cao, Q., Miao, Y., Shen, J., Yu, W., Yuan, F., Cheng, S., Huang, S., Wang, H., Yang, W., Liu, F., & Li, X. (2018). Evaluating two Crop Circle active canopy sensors for in-season diagnosis of winter wheat nitrogen status. Agronomy, 8(10), 201. https://doi.org/10.3390/agronomy8100201

Clevers, J. G. P. W., & Kooistra, L. (2012). Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(2), 574–583.

Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1–3), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.004

Craparo, A. C. W., Van Asten, P. J. A., Läderach, P., Jassogne, L. T. P., & Grab, S. W. (2017). Application of thermography for monitoring stomatal conductance of Coffea arabica under different shading systems. Science of the Total Environment, 609, 755–763. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.158

Delgado, J. A., Khosla, R., & Mueller, T. (2011). Recent advances in precision (target) conservation. Journal of Soil and Water Conservation, 66(6), 167A–170A. https://doi.org/10.2489/jswc.66.6.167A

DJI Enterprise. (2024, 18 de enero). Mastering LiDAR with DJI Enterprise: An introductory booklet [Guía técnica]. DJI Enterprise.

DJI. (2025). DJI Mavic 3M [Imagen promocional de dron con cámara multiespectral]. DJI Agriculture. https://ag.dji.com/mavic-3-m

Duarte-Carvajalino, J. M., Paramo-Alvarez, M., Ramos-Calderón, P. F., & González-Orozco, C. E. (2021). Estimation of canopy attributes of wild cacao trees using digital cover photography and machine learning algorithms. iForest - Biogeosciences and Forestry, 14(6), 517–521. https://doi.org/10.3832/ifor3936-014

Dung, C. D., Allran, J. W., Mabusela, W. T., Combs, D. K., & Zilahi-Balogh, G. M. G. (2023). Hyperspectral imaging for estimating leaf, flower, and fruit macronutrient concentrations and predicting strawberry yields. Frontiers in Plant Science, 14, 1250340. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1250340

Evett, S. R., Schwartz, R. C., Casanova, J. J., & Heng, L. K. (2012). Soil water sensing for water balance, ET and WUE. Agricultural Water Management, 104, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002

Falker. (2025). ClorofiLOG: Medidor digital del contenido de clorofila [Fotografía de producto]. https://www.falker.com.br/es/clorofilog

Farhan, S. M., Zhang, Y., Ji, Y., Cui, S., Tang, W., & Li, W. (2024). A comprehensive review of LiDAR applications in crop farming and precision agriculture. Sensors, 24(16), 5409. https://doi.org/10.3390/s24165409

Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. Annual Review of Resource Economics, 11, 313–335. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Annex 5. Measuring and assessing integrity of weather data. En Guidelines for computing crop water requirements and weather data assessment. FAO.

Fraga Junior, L. S., Hernández, F. B. T., & Santana, M. J. de. (2021). Transpiration of young cocoa trees under soil water availability in the eastern Amazon. Scientia Agricola, 78(5), e20200171. https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0171

Franzen, D. W., & Bu, H. (2022). Site-specific farming: Active-optical ground-based sensor algorithms as tools for determining top-dress N rate (SF1176-6). North Dakota State University Extension. https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/site-specific-farming-active-optical-ground-based-sensor-algorithms-tools

Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R., Carrasco, G., & Acevedo-Opazo, C. (2024). Transformative technologies in digital agriculture: Leveraging Internet of Things, remote sensing, and artificial intelligence for smart crop management. Journal of Sensor and Actuator Networks, 13(4), 39. https://doi.org/10.3390/jsan13040039

Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

García-Tejero, I. F., Hernández, A., Padilla-Díaz, C. M., Diaz-Espejo, A., Fernández, J. E., & Girón, I. F. (2018). Assessing the crop-water status in almond (Prunus dulcis Mill.) trees via thermal imaging camera connected to smartphone. Sensors, 18(4), 1050. https://doi.org/10.3390/s18041050

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Gitelson, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. Journal of Plant Physiology, 161(2), 165–173. https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, 58(3), 289–298. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7

Gutiérrez-Gordillo, S., Durán-Zuazo, V. H., Arco-Díaz, A., & García-Tejero, I. F. (2020). Assessing the water-stress baselines by thermal imaging for young almond trees under deficit irrigation. Water, 12(5), 1298. https://doi.org/10.3390/w12051298

Hanna Instruments. (2024). GroLine soil pH tester - HI981030 [Fotografía de producto]. https://hannainst.com/groline-soil-ph-tester.html

Hanna Instruments. (2024). Soil Test direct soil conductivity tester - HI98331 [Fotografía de producto]. Hanna Instruments.

Hinotek. (2025). HTC-1/HTC-2 clock / humidity & temperature [Fotografía de producto]. https://www.hinotek.com/lab/htc-1-clock-humidity-temperature/

Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., Moore,

A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., ... Keating, B. A. (2014). Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. Environmental Modelling & Software, 62, 327–350. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295–309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1–2), 195–213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Inoue, Y., Peñuelas, J., Miyata, A., & Mano, M. (2008). Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO2 flux measurements in rice. Remote Sensing of Environment, 112(1), 156–172. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.011

Jang, C., Namoi, N., Wolske, E., Wasonga, D., Behnke, G., Bowman, N. D., & Lee, D. K. (2024). Integrating plant morphological traits with remote-sensed multispectral imageries for accurate corn grain yield prediction. PLOS ONE, 19(4), e0297027. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297027

Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2427–2436. https://doi.org/10.1093/jxb/erh213

Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. Functional Plant Biology, 36(10–11), 978–989. https://doi.org/10.1071/FP09123

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 18(3–4), 235–265. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7

JXCT. (2025). Soil NPK meter RS485 precision soil fertility nutrient sensor for agriculture [Fotografía de producto]. JXCT-IoT. https://www.jxct-iot.com/product/showproduct.php?id=190

Kalaany, C. M. A., Kimaita, H. N., Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). The potential of low-cost IoT-enabled agrometeorological stations: A systematic review. Sensors, 25(19), 6020. https://doi.org/10.3390/s25196020

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture, 147, 70–90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016

Kitchen, N. R., Drummond, S. T., Lund, E. D., Sudduth, K. A., & Buchleiter, G. W. (2003). Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. Agronomy Journal, 95(3), 483–495. https://doi.org/10.2134/agronj2003.4830

Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences, 90–91, 100315. https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315

Lamb, D. W., & Brown, R. B. (2001). Remote-sensing and mapping of weeds in crops. Journal of Agricultural Engineering Research, 78(2), 117–125. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0630

Lamb, D. W., Frazier, P., & Adams, P. (2008). Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 61(1), 4–9. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.009

Li, F., Miao, Y., Chen, X., Sun, Z., Stueve, K., & Yuan, F. (2022). In-season prediction of corn grain yield through PlanetScope and Sentinel-2 images. Agronomy, 12(12), 3176. https://doi.org/10.3390/agronomy12123176

Lu, J., Miao, Y., Shi, W., Li, J., Yuan, F., Huang, S., & Wang, H. (2020). Developing a proximal active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain. Remote Sensing, 12(9), 1440. https://doi.org/10.3390/rs12091440

Marek9134. (2012). LiDAR-i lend [Ilustración]. Wikimedia Commons.

McCole, M., Porter, E., Dunne, N., & Diamond, D. (2023). A low-cost portable system for on-site detection of soil pH and potassium for smart fertiliser application. HardwareX, 14, e00470. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00470

McCutchan, H., & Shackel, K. A. (1992). Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (Prunus domestica L. cv. French). Journal of the American Society for Horticultural Science, 117(4), 607–611. https://doi.org/10.21273/JASHS.117.4.607

METER Group, Inc. (2018). TEROS 11/12 manual. https://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf

Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Oksanen, T. (2005). ISO 11783—Standard and its implementation. IFAC Proceedings Volumes, 38(2), 297–302.

Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A. I., & López-Granados, F. (2015). Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by

sensor resolution. Sensors, 15(3), 5609–5626. https://doi.org/10.3390/s150305609

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. Advances in Agronomy, 67, 1–85. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1

PTx Trimble. (2025). GreenSeeker handheld crop sensor [Fotografía de producto]. https://www.ptxag.com/us/en/products/brand/ptx-trimble/flow-application-control/greenseeker-handheld-crop-sensor.html

Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., & Schepers, J. S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. Agronomy Journal, 93(1), 131–138. https://doi.org/10.2134/agronj2001.931131x

Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Mullen, R. W., Freeman, K. W., Thomason, W. E., & Lukina, E. V. (2002). Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. Agronomy Journal, 94(4), 815–820. https://doi.org/10.2134/agronj2002.8150

Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., & Friedman, S. P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. Vadose Zone Journal, 2(4), 444–475. https://doi.org/10.2136/vzj2003.4440

Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. Computers and Electronics in Agriculture, 81, 124–141. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007

Rosero Peñafiel, T. A. (2020). Aplicación de índice de vegetación normalizada (NDVI) para determinar estado nutricional de maíz (Zea mays L.) en Paján-Manabí [Trabajo de titulación, Universidad Agraria del Ecuador].

Repositorio Institucional de la Universidad Agraria del Ecuador. https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ROSERO%20PE%C3%91AFIEL%20TYRONE%20ALEXIS.pdf

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En S. C. Freden, E. P. Mercanti, & M. A. Becker (Eds.), Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Volume I. Technical presentations (NASA SP-351, pp. 309–317). National Aeronautics and Space Administration.

Schimmelpfennig, D. (2016). Farm profits and adoption of precision agriculture (Economic Research Report No. 217). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.

Sentek Technologies. (2025). Sentek Drill & Drop™ probe manual. https://sentektechnologies.com/download/sentek-drill-drop-probe-manual/

Sethuramasamyraja, B., Adamchuk, V. I., Dobermann, A., Marx, D. B., Jones, D. D., & Meyer, G. E. (2008). Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents. Computers and Electronics in Agriculture, 60(2), 212–225. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.08.003

Sethuramasamyraja, B., Adamchuk, V. I., Marx, D. B., Dobermann, A., Meyer, G. E., & Jones, D. D. (2007). Analysis of an ion-selective electrode based methodology for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium, and nitrate contents. Transactions of the ASABE, 50(6), 1927–1935. https://doi.org/10.13031/2013.24088

Shamshiri, R. R., Weltzien, C., Hameed, I. A., Yule, I. J., Grift, T. E., Balasundram, S. K., Pitonakova, L., Ahmad, D., & Chowdhary, G. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(4), 1–14. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. Remote Sensing, 12(19), 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136

Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. Journal of Agricultural Engineering Research, 76(3), 267–275. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0577

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3), 426–437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s

Sudduth, K. A., Drummond, S. T., & Kitchen, N. R. (2001). Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 31(3), 239–264. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00185-X

Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., & Huete, A. (Eds.). (2018). Hyperspectral remote sensing of vegetation. CRC Press.

Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., & Huete, A. (2018). Fifty years of advances in hyperspectral remote sensing of agriculture and vegetation: Summary, insights, and highlights of Volume IV. En P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, & A. Huete (Eds.), Advanced applications in remote sensing of agricultural crops and natural vegetation (pp. 339–378). Taylor & Francis. https://doi.org/10.1201/9780429431166-15

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., Jr., & McMurtrey, J. E., III. (1980). Relationship of spectral data to grain yield variation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46(5), 657–666.

Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D. A., Pak, E. W., Mahoney, R., Vermote, E. F., & El Saleous, N. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 26(20), 4485–4498. https://doi.org/10.1080/01431160500168686

Walter, J. D. C., Edwards, J., McDonald, G., & Kuchel, H. (2019). Estimating biomass and canopy height with LiDAR for field crop breeding. Frontiers in Plant Science, 10, 1145. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01145

Zarco-Tejada, P. J., Berni, J. A. J., Suárez, L., Sepulcre-Cantó, G., Morales, F., & Miller, J. R. (2009). Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. Remote Sensing of Environment, 113(6), 1262–1275. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.016

Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Williams, L. E., Suárez, L., Berni, J. A. J., Goldhamer, D., & Fereres, E. (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects for assessment of water status in cereal crops. Remote Sensing of Environment, 138, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.012

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2–3), 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

Capítulo 6

Análisis de Datos y Toma de Decisiones



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. Comprender la importancia del análisis de datos en la AP como proceso fundamental para transformar información de campo en decisiones agronómicas oportunas, eficientes y sostenibles.

2. Identificar las principales fuentes de datos utilizadas en AP, incluyendo sensores de suelo y cultivo, estaciones meteorológicas, drones, imágenes satelitales, maquinaria agrícola, mapas de rendimiento y registros históricos de manejo.

3. Diferenciar las etapas del proceso de gestión de datos agrícolas, desde la captura, organización, depuración y almacenamiento, hasta el procesamiento, interpretación, visualización y aplicación en la toma de decisiones.

4. Analizar la variabilidad espacial y temporal del sistema productivo mediante herramientas estadísticas, geoestadísticas, sistemas de información geográfica y plataformas digitales de análisis agrícola.

5. Interpretar mapas temáticos, mapas de rendimiento, mapas de prescripción, índices de vegetación y tableros de control como instrumentos para apoyar decisiones sobre fertilización, riego, control fitosanitario y planificación de labores.

6. Comprender el papel de los modelos de simulación agrícola, como DSSAT, AquaCrop y otros sistemas de apoyo a la decisión, en la evaluación de escenarios productivos, climáticos, edáficos y de manejo.

7. Reconocer la utilidad de la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y el Big data agrícola para identificar patrones

complejos, generar predicciones, anticipar riesgos y formular recomendaciones agronómicas más precisas.

8. Integrar datos edáficos, climáticos, fisiológicos, topográficos y productivos para delimitar zonas de manejo diferenciado y diseñar estrategias de intervención sitio-específicas.

9. Evaluar la calidad, confiabilidad, interoperabilidad y pertinencia de los datos agrícolas como condiciones esenciales para evitar errores de interpretación y mejorar la efectividad de las decisiones técnicas.

10. Valorar críticamente los beneficios, limitaciones y desafíos del uso de datos en la AP, considerando aspectos como conectividad rural, formación técnica, gobernanza de datos, costos de implementación y apropiación tecnológica por parte de productores y profesionales del agro.

11. Proponer esquemas básicos de toma de decisiones basados en evidencia, articulando conocimiento agronómico, análisis espacial, modelación, criterio técnico y sostenibilidad ambiental.

12. Reconocer la importancia de formar profesionales capaces de interpretar datos agrícolas con enfoque interdisciplinario, integrando agronomía, estadística, informática, análisis territorial, inteligencia artificial y ética en el manejo de la información.

Conceptos clave

- Análisis de datos agrícolas: Proceso mediante el cual la información recolectada en campo, laboratorio o plataformas digitales se organiza, depura, procesa e interpreta para generar conocimiento útil en la toma de decisiones agronómicas.

- Toma de decisiones basada en datos: Estrategia de manejo agrícola en la que las decisiones sobre riego, fertilización, sanidad,

siembra o cosecha se sustentan en información objetiva, medible, georreferenciada y técnicamente interpretada.

- Dato agrícola: Unidad básica de información generada por sensores, estaciones meteorológicas, drones, satélites, maquinaria, análisis de suelo, registros de campo o plataformas digitales, que describe una condición específica del sistema productivo.

- Información agronómica: Conjunto de datos procesados y contextualizados que permiten comprender el comportamiento del suelo, el cultivo, el clima y las prácticas de manejo dentro de un sistema agrícola.

- Conocimiento operativo: Resultado de interpretar datos e información bajo criterios técnicos, permitiendo formular acciones concretas de manejo, corrección, prevención o planificación en el cultivo.

- Calidad de datos: Grado de confiabilidad, exactitud, consistencia y utilidad de los datos recolectados. Una buena calidad de datos es indispensable para evitar diagnósticos erróneos y decisiones agronómicas inadecuadas.

- Depuración de datos: Proceso técnico mediante el cual se corrigen, eliminan o ajustan datos incompletos, duplicados, atípicos o inconsistentes antes de realizar análisis estadísticos, espaciales o predictivos.

- Base de datos agrícola: Sistema organizado de almacenamiento de información relacionada con suelo, clima, cultivo, rendimiento, insumos, labores, sensores y registros históricos de una finca o sistema productivo.

- Big data agrícola: Conjunto masivo, diverso y dinámico de datos generados por múltiples fuentes del agroecosistema, cuyo análisis

permite identificar patrones, tendencias y relaciones útiles para mejorar la toma de decisiones.

- Analítica agrícola: Aplicación de métodos estadísticos, computacionales y agronómicos para examinar datos agrícolas y convertirlos en diagnósticos, predicciones o recomendaciones de manejo.

- Estadística descriptiva: Conjunto de métodos que permiten resumir y caracterizar los datos mediante promedios, rangos, desviaciones, frecuencias y medidas de variabilidad.

- Geoestadística: Rama de la estadística aplicada al análisis de datos espaciales, utilizada para estudiar la distribución de variables como pH, materia orgánica, humedad, conductividad eléctrica o rendimiento dentro de un lote.

- Interpolación espacial: Técnica que permite estimar valores de una variable en sitios no muestreados a partir de puntos conocidos, facilitando la generación de mapas continuos de suelo, cultivo o clima.

- Kriging: Método geoestadístico de interpolación que estima valores espaciales considerando la estructura de dependencia entre los puntos muestreados, utilizado para construir mapas de alta confiabilidad técnica.

- IDW: Método de interpolación basado en la distancia, en el cual los puntos cercanos tienen mayor influencia sobre la estimación de valores en lugares no muestreados.

- Sistema de Información Geográfica: Plataforma digital que permite almacenar, integrar, analizar y visualizar datos espaciales del sistema productivo, facilitando la construcción de mapas y la toma de decisiones sitio-específicas.

- Mapa temático: Representación espacial de una variable específica, como fertilidad, humedad, pendiente, rendimiento, vigor vegetal o incidencia de plagas, utilizada para interpretar la variabilidad del lote.

- Mapa de rendimiento: Representación georreferenciada de la productividad obtenida durante la cosecha, útil para identificar zonas de alto, medio y bajo desempeño dentro del predio.

- Mapa de prescripción: Archivo o representación espacial que indica la dosis, intensidad o tipo de manejo recomendado para cada zona del lote, especialmente en fertilización, riego o aplicación de insumos.

- Zona de manejo: Área relativamente homogénea dentro del predio, definida a partir de datos de suelo, clima, topografía, vigor, rendimiento o sanidad, que permite aplicar estrategias diferenciadas de manejo.

- Variabilidad espacial: Diferencias que se presentan dentro de un mismo lote en propiedades del suelo, disponibilidad de agua, vigor del cultivo, nutrientes, pendiente o rendimiento.

- Variabilidad temporal: Cambios que ocurren en el sistema productivo a través del tiempo, asociados al clima, fenología, humedad, nutrición, presión fitosanitaria o manejo agronómico.

- Modelo predictivo: Herramienta estadística o computacional que utiliza datos históricos y actuales para anticipar comportamientos futuros del cultivo, como rendimiento, estrés hídrico, riesgo de enfermedad o demanda nutricional.

- Modelo de simulación agrícola: Sistema computacional que representa el comportamiento del cultivo bajo diferentes condiciones de suelo, clima y manejo, permitiendo evaluar escenarios antes de tomar decisiones en campo.

- DSSAT: Sistema de soporte para la decisión orientado a simular crecimiento, desarrollo y rendimiento de cultivos bajo distintos escenarios climáticos, edáficos y de manejo.

- AquaCrop: Modelo desarrollado para simular la respuesta del cultivo al agua, útil en la planificación del riego, evaluación del estrés hídrico y análisis de productividad bajo diferentes condiciones de disponibilidad hídrica.

- Sistema de soporte a la decisión: Herramienta que integra datos, modelos, reglas técnicas y visualizaciones para apoyar decisiones agronómicas más precisas y fundamentadas.

- Dashboard agrícola: Panel visual que presenta indicadores, mapas, alertas, gráficos y resultados de análisis para facilitar la interpretación rápida del estado del sistema productivo.

- Inteligencia artificial: Conjunto de métodos computacionales capaces de analizar grandes volúmenes de datos, reconocer patrones, generar predicciones y apoyar decisiones agronómicas complejas.

- Aprendizaje automático: Rama de la inteligencia artificial que permite entrenar modelos a partir de datos para clasificar, predecir o recomendar acciones de manejo agrícola.

- Algoritmo: Secuencia lógica de instrucciones que permite procesar datos, identificar patrones o generar resultados útiles para el análisis agrícola.

- Analítica predictiva: Uso de modelos estadísticos, inteligencia artificial y aprendizaje automático para anticipar eventos futuros del sistema productivo, como déficit hídrico, caída de rendimiento o aparición de estrés.

- Analítica prescriptiva: Proceso mediante el cual los datos y modelos no solo predicen un problema, sino que sugieren acciones específicas para corregirlo o prevenirlo.

- Agricultura predictiva: Enfoque que utiliza datos históricos, sensores, modelos e inteligencia artificial para anticipar necesidades del cultivo y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

- Agricultura prescriptiva: Enfoque que genera recomendaciones específicas de manejo, como dosis de fertilizante, frecuencia de riego o zonas prioritarias de intervención, a partir del análisis integrado de datos.

- Interoperabilidad: Capacidad de sensores, plataformas, maquinaria, software y bases de datos para comunicarse e intercambiar información de manera compatible y funcional.

- Trazabilidad de datos: Capacidad de registrar el origen, procesamiento, transformación y uso de los datos agrícolas, garantizando transparencia y confiabilidad en la toma de decisiones.

- Gobernanza de datos agrícolas: Conjunto de normas, acuerdos y principios relacionados con la propiedad, acceso, uso, protección y manejo ético de la información generada en los sistemas productivos.

- Retroalimentación continua: Proceso mediante el cual los datos obtenidos después de una intervención agrícola se utilizan para evaluar resultados, ajustar modelos y mejorar decisiones futuras.

- Incertidumbre agronómica: Grado de desconocimiento o variabilidad que afecta la toma de decisiones en el sistema productivo, asociado a clima, suelo, cultivo, mercado o calidad de los datos.

- Decisión sitio-específica: Acción agronómica ajustada a las condiciones particulares de una zona del predio, en lugar de aplicar una recomendación uniforme sobre todo el lote.

- Gestión inteligente del cultivo: Manejo agrícola basado en la integración de datos, sensores, modelos, análisis espacial y criterio agronómico para mejorar productividad, sostenibilidad y eficiencia en el uso de recursos.

- Ética en el uso de datos agrícolas: Principio que orienta el manejo responsable de la información productiva, garantizando transparencia, privacidad, seguridad y beneficio para los productores y comunidades rurales.

Desarrollo técnico

Análisis de datos y toma de decisiones en la agricultura de precisión

La evolución de la agricultura ha estado marcada por una búsqueda constante de sistemas productivos más eficientes, rentables y ambientalmente sostenibles. Desde la Revolución Verde de la década de 1960, caracterizada por la expansión del uso de fertilizantes sintéticos y pesticidas, hasta la actual era digital, la toma de decisiones en el sector agropecuario ha atravesado una transformación profunda. En este escenario, la AP se ha consolidado como una estrategia innovadora orientada a optimizar el uso de los recursos, mejorar la eficiencia agronómica y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de producción. Como explicaron Pierce y Nowak (1999), y posteriormente Zhang, Wang y Wang (2002), este enfoque se fundamenta en el reconocimiento de la variabilidad espacial y temporal del agroecosistema, mientras que Gebbers y Adamchuk (2010) destacaron que su verdadero potencial radica en integrar tecnologías capaces de convertir grandes volúmenes de datos en decisiones agronómicas más exactas.

En las primeras etapas del desarrollo agrícola, la obtención de información de campo era limitada y dependía principalmente de observaciones visuales, registros manuales y decisiones basadas en la experiencia acumulada del productor. Sin embargo, el avance tecnológico permitió incorporar herramientas mucho más precisas para la captura de datos, entre ellas sensores de suelo, estaciones meteorológicas automáticas, drones e imágenes satelitales. De acuerdo con Gebbers y Adamchuk (2010), estos dispositivos facilitan la recolección continua y en tiempo real de variables clave, tales como humedad del suelo, temperatura ambiental, pH, disponibilidad de nutrientes, índices de vegetación y niveles de estrés hídrico, lo que ha ampliado sustancialmente la capacidad de comprensión del comportamiento de los cultivos y del ambiente donde se desarrollan.

Una vez recolectada la información, se requiere un proceso riguroso de organización, depuración, procesamiento e interpretación para convertir los datos en conocimiento útil. En AP, este análisis involucra herramientas estadísticas, modelos predictivos, algoritmos de aprendizaje automático y sistemas de soporte para la decisión. En este sentido, Jones et al. (2003) señalaron que plataformas como DSSAT permiten simular el crecimiento y la productividad de los cultivos bajo diferentes escenarios de clima, suelo y manejo, mientras que Steduto et al. (2009) demostraron que modelos como AquaCrop facilitan la evaluación de la respuesta del cultivo al agua y mejoran la planificación del riego. Gracias a estas herramientas, el productor puede anticipar escenarios, comparar alternativas y adoptar decisiones con mayor base técnica y menor incertidumbre.

La toma de decisiones en AP se sustenta, por tanto, en la integración de datos históricos, condiciones actuales del suelo y del clima, e información predictiva sobre el comportamiento futuro del sistema productivo. Por ejemplo, el uso de imágenes satelitales y sensores remotos permite detectar de manera oportuna zonas con estrés hídrico, deficiencias nutricionales o bajo vigor vegetativo. Según Zhang et al. (2002), esta capacidad de diferenciación espacial constituye uno de los principales aportes de la AP, ya que hace posible aplicar insumos únicamente donde son necesarios,

en la dosis adecuada y en el momento oportuno. En consecuencia, no solo se reducen costos operativos, sino que también disminuyen las pérdidas de fertilizantes, agua y agroquímicos, con beneficios directos sobre la rentabilidad y el desempeño ambiental del sistema.

En la agricultura contemporánea, el análisis de datos ya no se limita a describir lo que ocurre en el lote, sino que permite interpretar tendencias, modelar escenarios y orientar decisiones estratégicas a corto, mediano y largo plazo. De este modo, la AP trasciende la simple incorporación de dispositivos tecnológicos y se convierte en una lógica de gestión sustentada en evidencia. En un contexto marcado por la variabilidad climática, la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de producir más con menor impacto ambiental, el uso inteligente de los datos representa una de las bases más sólidas para avanzar hacia sistemas agrícolas más resilientes, eficientes y sostenibles.

1. Introducción a los sistemas de información geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica constituyen herramientas computacionales diseñadas para capturar, almacenar, organizar, analizar y representar datos con referencia espacial. En AP, su importancia radica en que permiten integrar información procedente de múltiples fuentes, como imágenes satelitales, drones, sensores de campo, estaciones meteorológicas y análisis de suelo, con el fin de generar una representación espacial detallada del comportamiento del agroecosistema. Como señalaron Pierce y Nowak (1999) y Zhang et al. (2002), esta capacidad de integración convierte a los SIG en un componente esencial para comprender la variabilidad intrapredial y apoyar decisiones agronómicas diferenciadas.

Además de representar cartográficamente la distribución espacial de variables del suelo y del cultivo, los SIG facilitan el análisis multitemporal y la correlación entre factores edáficos, climáticos, topográficos y productivos. Esta funcionalidad permite identificar patrones, delimitar zonas homogéneas de manejo y optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes, semillas y productos fitosanitarios. En consecuencia, los

SIG no solo mejoran la eficiencia técnica de las intervenciones, sino que también contribuyen a disminuir el impacto ambiental derivado del manejo uniforme de terrenos heterogéneos.

El origen de los SIG se remonta a la década de 1960, cuando Roger Tomlinson desarrolló el Canadá Geographic Information System con el propósito de organizar y analizar información relacionada con el uso del suelo y los recursos naturales. A partir de ese momento, la tecnología evolucionó desde sistemas rudimentarios y de difícil acceso hacia plataformas digitales cada vez más robustas, especializadas y amigables para el usuario. Con el crecimiento de la computación personal, el desarrollo de software geoespacial y la disponibilidad de imágenes satelitales, los SIG se expandieron progresivamente hacia sectores como la planificación territorial, la gestión ambiental y, de manera muy especial, la AP.

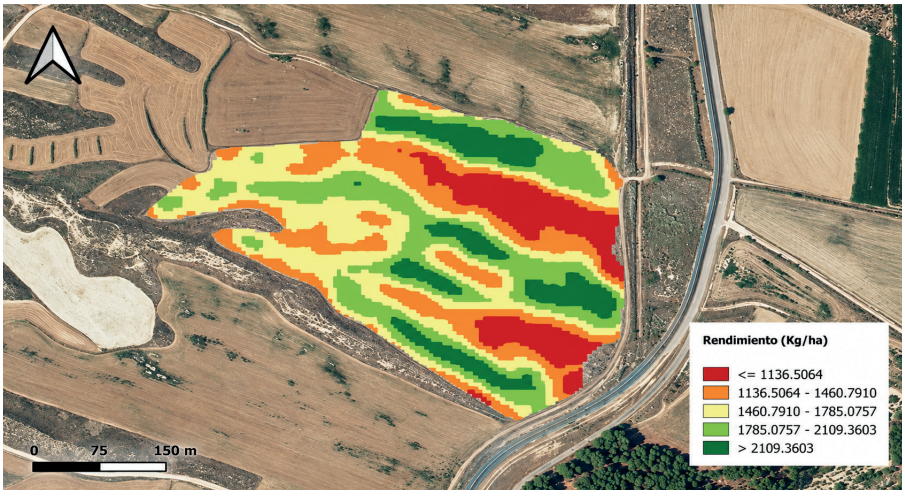
En el ámbito agrícola, los SIG permiten articular diferentes modalidades de monitoreo. El monitoreo pasivo se apoya en sensores remotos que registran la radiación reflejada por la superficie terrestre, como ocurre con imágenes satelitales o drones multiespectrales. A partir de esta información es posible calcular índices de vegetación. Rouse et al. (1974) propusieron el NDVI como una herramienta útil para estimar el vigor vegetal, mientras que Huete (1988) desarrolló el SAVI para reducir la influencia del suelo en la respuesta espectral de la vegetación. Estos índices han sido ampliamente utilizados para evaluar crecimiento, estado fenológico y estrés vegetal.

Por su parte, el monitoreo activo emplea sensores que emiten su propia señal, como ocurre con tecnologías radar o LiDAR, capaces de estimar características topográficas, estructura de la cobertura vegetal o humedad del suelo, incluso bajo condiciones de nubosidad o baja iluminación. Cuando esta información se combina con mediciones in situ obtenidas mediante sondas, sensores de humedad, estaciones meteorológicas y análisis directos de campo, se configura un sistema de monitoreo integrado mucho más robusto. Esta complementariedad mejora la caracterización del agroecosistema y fortalece la toma de decisiones específicas por sitio.

La utilidad práctica de los SIG en la agricultura actual es amplia. Una de sus aplicaciones más relevantes es la delimitación de zonas de manejo dentro de una misma finca, agrupando áreas relativamente homogéneas en función de variables edáficas, topográficas o productivas. En este sentido, Moral et al. (2010) demostraron que la zonificación permite una gestión más racional de la variabilidad espacial. De manera complementaria, Sudduth et al. (2005) evidenciaron que la conductividad eléctrica aparente del suelo puede relacionarse con propiedades edáficas de interés agronómico, lo que facilita el ajuste de estrategias de muestreo, fertilización y manejo diferencial.

En síntesis, los SIG constituyen una herramienta central dentro de la AP (ver figura 1) porque permiten transformar datos dispersos en información espacialmente organizada, interpretable y útil para la toma de decisiones (ver figura 1). Su valor no reside únicamente en la elaboración de mapas, sino en su capacidad para integrar fuentes de información, detectar patrones de variabilidad y orientar intervenciones más eficientes, rentables y sostenibles dentro de los sistemas productivos.

Figura 1. *Mapa de rendimiento generados por cosechadora equipadas con GPS en caña*



Fuente: López, (2019)

En cultivos perennes como el cacao y el café, los sistemas de información geográfica (SIG) se consolidan como herramientas estratégicas para el análisis espacial y la toma de decisiones agronómicas. Su uso permite identificar con precisión zonas con alta pendiente y, por tanto, mayor susceptibilidad a la erosión, así como áreas que presentan estrés hídrico o algún tipo de afectación fitosanitaria.

Esta capacidad de geolocalizar y caracterizar detalladamente el terreno orienta de manera más eficiente decisiones relacionadas con la poda, la implementación de sistemas de riego localizado y el establecimiento de coberturas vegetales protectoras, lo que favorece tanto el manejo agronómico como la conservación del suelo, tal como señalan Pérez-Castro et al. (2017).

Del mismo modo, en los programas de monitoreo fitosanitario (ver figura 2), los SIG permiten mapear la incidencia y la severidad de plagas y enfermedades, facilitando la planificación de tratamientos localizados en lugar de aplicaciones uniformes sobre toda la superficie cultivada. Como resultado, este enfoque contribuye a disminuir de manera importante el uso de agroquímicos y, en consecuencia, reduce la contaminación ambiental y el impacto sobre la biodiversidad, en concordancia con lo reportado por Lamb et al. (2008).

Un ejemplo concreto de la aplicación de estas tecnologías se observa en Colombia, donde la integración de los sistemas de información geográfica con imágenes capturadas mediante drones ha permitido a asociaciones de pequeños productores de cacao en departamentos como Nariño y Cauca realizar diagnósticos espaciales más detallados de la productividad. Esta capacidad ha facilitado la implementación de prácticas agroecológicas ajustadas a la variabilidad intrínseca del terreno, a la disponibilidad de fuentes hídricas y a la cercanía de zonas de conservación, favoreciendo una gestión más adaptativa y sostenible del sistema productivo, como lo plantea el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2020).

Figura 2: *Mapa de incidencia y severidad de enfermedades en papa*



Fuente: Modificado de Rezatec, citado en PotatoPro (2018).

En Brasil, diversos estudios desarrollados en cultivos de caña de azúcar y soya han evidenciado mejoras importantes en la eficiencia del uso del nitrógeno mediante la construcción de mapas de aplicación variable apoyados en entornos SIG. De acuerdo con Molin et al. (2015), este enfoque permite optimizar la distribución espacial de nutrientes y reducir pérdidas asociadas con lixiviación o volatilización. En Europa, por su parte, la adopción de SIG ha sido promovida en programas vinculados con la agricultura de conservación y los pagos por servicios ambientales, integrando información geoespacial para verificar el cumplimiento de buenas prácticas agrícolas y fortalecer la sostenibilidad territorial.

A escala global, se advierte una tendencia creciente hacia la integración de los SIG con la inteligencia artificial, especialmente a través del desarrollo de modelos de aprendizaje automático capaces de interpretar grandes volúmenes de datos geoespaciales. Según Kamilaris y Prenafeta-

Boldú (2018), esta convergencia tecnológica ha ampliado la capacidad de predecir rendimientos, anticipar la ocurrencia de enfermedades y estimar requerimientos de riego con niveles de precisión cada vez más altos. En consecuencia, los SIG se consolidan como una de las bases estructurales de la AP moderna, ya que permiten una comprensión más profunda de la dinámica espacio-temporal del territorio agrícola y fortalecen la articulación con otras tecnologías, como sensores directos, sistemas GPS/GNSS, teledetección e inteligencia artificial.

2. Análisis de datos multivariable en la agricultura de precisión

El análisis de datos multivariable, también denominado análisis multivariado, constituye una rama especializada de la estadística orientada al estudio simultáneo de múltiples variables, tanto independientes como dependientes. Su propósito principal es identificar patrones complejos, establecer asociaciones significativas, explicar la variabilidad de los datos y comprender relaciones de dependencia dentro de sistemas naturales o artificiales. AP, este enfoque se utiliza para integrar grandes volúmenes de información heterogénea procedente de sensores remotos, estaciones meteorológicas, plataformas de Internet de las Cosas, imágenes satelitales y dispositivos móviles, con el fin de optimizar la toma de decisiones, mejorar el uso de insumos, predecir rendimientos y reducir riesgos productivos, como han señalado Khosla (2010) y Zhang et al. (2002).

A diferencia de los métodos univariados, que se centran en una sola variable por vez, el análisis multivariable adopta una visión integral del sistema agrícola. Bajo esta perspectiva, el agroecosistema se entiende como una red compleja en la que interactúan de manera simultánea y no lineal propiedades del suelo, condiciones climáticas, genotipo del cultivo y prácticas de manejo. Por ello, su aplicación resulta especialmente útil para modelar respuestas agronómicas bajo condiciones reales de campo y para interpretar de manera más precisa la variabilidad intra e interparcela.

Desde una perspectiva histórica, el análisis multivariable comenzó a consolidarse durante la primera mitad del siglo XX con el desarrollo

de técnicas fundamentales como el análisis de componentes principales, el análisis discriminante lineal, la regresión múltiple y el análisis de conglomerados. Hotelling (1933) sentó una base importante con la formulación del análisis de componentes principales, mientras que Fisher (1936) contribuyó de manera decisiva al análisis discriminante. Aunque estas herramientas surgieron inicialmente en campos como la psicología, la biología y la economía, su incorporación en las ciencias agropecuarias se intensificó de forma marcada durante las últimas décadas, impulsada por los avances en computación, estadística bayesiana, aprendizaje automático y disponibilidad de big data, tal como destacaron Gebbers y Adamchuk (2010).

El desarrollo de los sistemas de información geográfica, los sensores remotos y las plataformas de agricultura digital transformó profundamente la forma en que productores e investigadores interpretan la variabilidad espacial del terreno. Gracias a ello, hoy es posible aplicar modelos multivariables para clasificar zonas de manejo, identificar factores limitantes, estimar curvas de respuesta del cultivo y generar mapas de recomendación con mayor soporte científico. En este contexto, las fuentes de información para el análisis multivariable se han diversificado notablemente y pueden agruparse en tres grandes categorías: sensores directos o in situ, sensores remotos aéreos o satelitales, y sensores proximales instalados en vehículos o drones.

Posteriormente, toda esta información se integra en plataformas de análisis que permiten realizar procesos de depuración, reducción de dimensionalidad, exploración multivariada y modelado predictivo. Para ello, se emplean técnicas como redes neuronales, árboles de decisión, regresión logística, máquinas de vectores de soporte y modelos probabilísticos más complejos. En esa línea, Shahhosseini et al. (2021) mostraron que la combinación entre herramientas de aprendizaje automático y modelación agrícola mejora la capacidad predictiva y fortalece la toma de decisiones dentro de sistemas de producción cada vez más digitalizados.

Actualmente, los métodos de análisis multivariable más empleados en el ámbito de la AP incluyen (ver tabla 1):

Tabla 1. *Métodos de análisis multivariable empleados en AP.*

Método de análisis multivariable	Descripción / finalidad en AP	Aplicación principal	Referencia
Análisis de componentes principales (PCA)	Se utiliza para reducir la dimensionalidad de grandes conjuntos de datos y facilitar la visualización de patrones espaciales complejos.	Análisis de propiedades del suelo y respuestas fisiológicas del cultivo.	Jensen et al. (2007)
Análisis de conglomerados (clustering)	Permite agrupar unidades con características similares, ayudando a identificar zonas homogéneas de manejo.	Delimitación de zonas de manejo con base en múltiples variables agronómicas.	Mallarino y Wittry (2004)
Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR)	Integra variables espectrales y ambientales para construir modelos predictivos robustos.	Predicción de rendimiento y calidad de frutos.	Zude-Sasse et al. (2016)
Modelos de clasificación (Random Forest, Support Vector Machines)	Se emplean para clasificar datos complejos y reconocer patrones no lineales en grandes volúmenes de información agrícola.	Detección de enfermedades, discriminación varietal y análisis fenotípico a gran escala.	Pantazi et al. (2016)
Aprendizaje profundo (deep learning)	Está ganando importancia por su capacidad para procesar imágenes multiespectrales y series temporales con alta precisión.	Predicción de rendimientos y detección temprana de estrés en cultivos.	Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018)

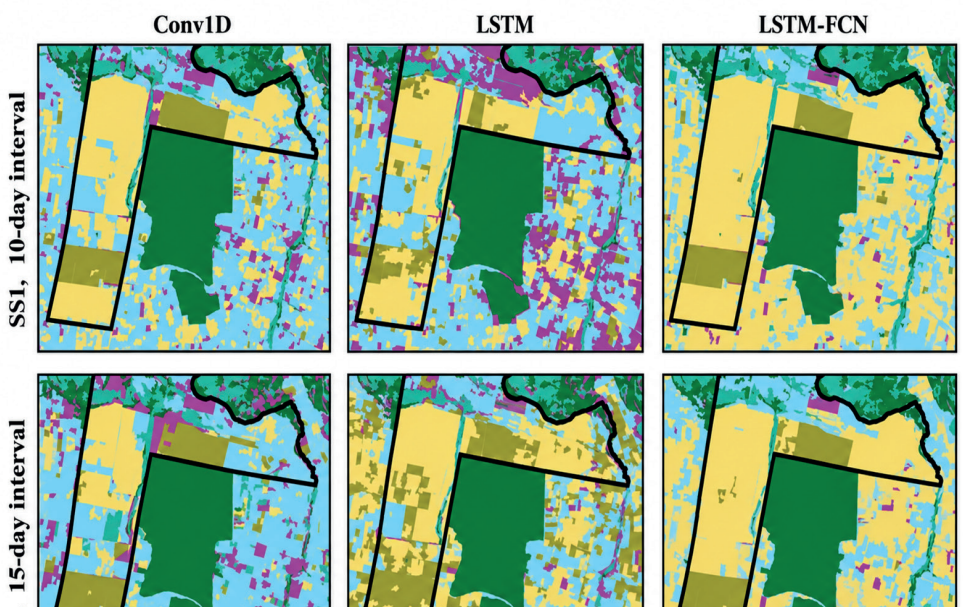
Fuente: Esta investigación

Un ejemplo ampliamente citado del uso del análisis multivariable en AP (ver figura 3) es la síntesis presentada y confirmada también por Mulla (2013), quien documentó cómo la integración de datos de sensores de suelo, teledetección, sistemas de posicionamiento y registros históricos de rendimiento ha fortalecido la delimitación de zonas de manejo específico dentro de los lotes agrícolas. A partir de esta combinación de fuentes, es posible aplicar técnicas multivariadas, como el análisis de conglomerados, para identificar sectores con respuestas agronómicas diferenciadas y, con

ello, orientar decisiones de manejo más precisas en cultivos extensivos como el maíz.

En esa misma línea, Lambert, Lowenberg-DeBoer y Malzer (2006) analizaron los patrones espaciales y temporales de respuesta del maíz y la soya al nitrógeno y al fósforo, mostrando que la variabilidad dentro del lote tiene implicaciones directas sobre la rentabilidad y sobre la eficiencia del manejo fertilizante. En términos agronómicos, este tipo de enfoque permite ajustar mejor la aplicación de nutrientes por sitio específico, lo que contribuye tanto a mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno como a disminuir el riesgo de sobreaplicación y sus efectos ambientales.

Figura 3. *Comparación espacial de los mapas generados por los modelos Conv1D, LSTM y LSTM-FCN bajo intervalos SSI de 10 y 15 días para la delimitación de zonas de manejo en campos de maíz.*



Fuente: Bueno et al. (2023).

Otro caso ilustrativo de la aplicación del análisis multivariable corresponde al trabajo de Gitelson et al. (2003), quienes emplearon modelos multivariables basados en regresión múltiple y análisis espectral para estimar con precisión el contenido de clorofila en hojas de soya a partir de la reflectancia registrada en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano. Esta metodología permitió realizar un diagnóstico temprano de deficiencias nutricionales y, en consecuencia, facilitó la implementación de medidas correctivas oportunas, optimizando así la gestión de nutrientes en el cultivo.

De manera similar, en cultivos perennes de alto valor, como el viñedo, el análisis multivariable ha demostrado gran utilidad al integrar información topográfica, edáfica, meteorológica y de reflectancia. Según Hall et al. (2002), esta integración ha permitido modelar la variabilidad espacial del contenido de azúcares y ácidos en las uvas, favoreciendo una mejor planificación de la cosecha y de los procesos de vinificación, y contribuyendo a una calidad más homogénea del producto final.

En el cultivo de cacao, investigaciones recientes han aprovechado el análisis de componentes principales y las técnicas de agrupamiento para definir tipologías de suelo y microclimas específicos. De acuerdo con Niether et al. (2020), estas tipologías pueden correlacionarse con perfiles organolépticos diferenciados del grano, lo que abre posibilidades para fortalecer esquemas de denominación de origen y consolidar sistemas de trazabilidad que agreguen valor al producto y respalden su autenticidad.

Todo lo anterior demuestra que el análisis de datos multivariable trasciende la condición de una herramienta meramente estadística y se configura como una estrategia integral de conocimiento, interpretación y acción agronómica. Su aplicación en contextos de elevada complejidad ambiental y socioeconómica contribuye de manera significativa a una comprensión más profunda del agroecosistema. Como señalan Lowenberg-DeBoer (2018) y Schimmelpfennig (2016), la integración de fuentes de datos diversas no solo favorece la optimización en el uso de los recursos, sino que

también impulsa el tránsito hacia una agricultura más inteligente, sostenible y resiliente. No obstante, la implementación efectiva de este enfoque exige no solo infraestructura tecnológica y capacidades computacionales adecuadas, sino también competencias interdisciplinarias que articulen saberes agronómicos, estadísticos y digitales.

Se prevé que, en el futuro cercano, se consoliden plataformas integradas de análisis multivariable en la nube, alimentadas de forma automatizada por sensores, sistemas de aprendizaje automático autoajustables y herramientas de visualización geoespacial interactiva. Estas plataformas permitirán llevar la ciencia de datos directamente al campo y ponerla al servicio del productor en tiempo real, facilitando decisiones más oportunas y contextualizadas.

3. Estrategias de manejo basadas en datos

Las estrategias de manejo basadas en datos constituyen uno de los pilares fundamentales de la AP. Representan un cambio sustancial en la toma de decisiones agrícolas, al sustituir enfoques generalizados y uniformes por sistemas de manejo ajustados a las condiciones particulares de cada sitio. En este sentido, pueden definirse como un conjunto de procedimientos sistemáticos que integran datos multiescalares y multidimensionales, incluidos aquellos de tipo edáfico, climático, topográfico, fisiológico, económico y logístico, con el fin de planificar, ejecutar y evaluar acciones agronómicas con alta precisión espacial y temporal, tal como lo expusieron Pierce y Nowak (1999) y Gebbers y Adamchuk (2010).

El principio que sustenta estas estrategias es que la variabilidad inherente a los sistemas agrícolas puede medirse, modelarse y utilizarse de manera efectiva para optimizar el uso de insumos, reducir costos operativos, minimizar impactos ambientales y, simultáneamente, incrementar la productividad y la sostenibilidad del agroecosistema. Este enfoque favorece una asignación más racional de los recursos, aspecto especialmente relevante en un contexto de creciente presión sobre la tierra y el agua.

La evolución histórica de estas estrategias se remonta a finales del siglo XX, cuando los avances tecnológicos permitieron incorporar sistemas de posicionamiento global, sensores remotos y sistemas de información geográfica. Estos desarrollos hicieron posible una agricultura sustentada en la observación objetiva de la variabilidad espacial y temporal del campo. Según Lowenberg-DeBoer y Swinton (1997), así como Bullock y Lowenberg-DeBoer (2007), durante la década de 1980 los primeros ensayos de AP en Estados Unidos se orientaron a la aplicación variable de fertilizantes, apoyándose en mapas de rendimiento generados por cosechadoras equipadas con sensores especializados.

A medida que la tecnología se hizo más accesible y diversa, surgieron nuevas formas de monitoreo que permitieron una recolección de datos más automatizada, intensiva y en tiempo real, dando paso al concepto de agricultura 4.0. Esta nueva etapa, caracterizada por una mayor digitalización y conectividad entre dispositivos, sensores e inteligencia artificial, ha ampliado considerablemente las posibilidades de gestión en el ámbito agrícola, como lo plantean Zhang et al. (2002) y Wolfert et al. (2017).

Entre las tecnologías más utilizadas actualmente para implementar estrategias de manejo basadas en datos, destacan diversas herramientas que permiten capturar, procesar e interpretar información del sistema productivo con creciente precisión (ver tabla 2).

Tabla 2. *Tecnologías fundamentales empleadas en AP*

Tecnología	Función principal en AP	Aplicación agronómica
GPS y GNSS	Los sistemas GPS y GNSS permiten la georreferenciación precisa de datos, maquinaria y puntos de muestreo; según Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004), esta precisión espacial es la base operativa del manejo sitio-específico.	Se utilizan para elaborar mapas de prescripción, mapas de rendimiento y análisis de variabilidad espacial orientados al manejo diferenciado de parcelas, como lo explican Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004).

Tecnología	Función principal en AP	Aplicación agronómica
Sensores remotos (satélites y drones)	Los sensores remotos, a través de satélites y plataformas aéreas, permiten observar el cultivo a múltiples escalas; Mulla (2013) destaca su utilidad para captar variaciones espaciales y temporales asociadas con nutrientes, agua, plagas, enfermedades y biomasa.	Se aplican en el monitoreo del vigor vegetal, la detección de estrés, la evaluación de cobertura y el seguimiento del estado del cultivo en el tiempo, tal como resume Mulla (2013).
Sensores in situ	Los sensores in situ generan información directa y localizada sobre el suelo y el cultivo; Adamchuk, Hummel, Morgan y Upadhyaya (2004) señalan que estos sensores permiten medir propiedades como humedad, conductividad eléctrica aparente y otras variables relacionadas con la condición física y química del suelo.	Se emplean para estimar humedad, conductividad aparente, materia orgánica, textura y compactación, apoyando diagnósticos agronómicos de alta resolución, de acuerdo con Adamchuk et al. (2004).
Plataformas de gestión agrícola digital	Las plataformas digitales integran múltiples capas de información en un solo entorno. Climate FieldView indica que su plataforma recopila, almacena y analiza datos para apoyar decisiones agronómicas; John Deere señala que Operations Center conecta datos de campos, máquinas y operarios; y Ag Leader describe SMS como una herramienta de mapeo y análisis para decisiones durante todo el año.	Se utilizan para integrar datos de sensores, maquinaria, clima, suelos y rendimientos, facilitando la visualización, el análisis y la formulación de recomendaciones diferenciales. Entre los ejemplos más conocidos están Climate FieldView, John Deere Operations Center y Ag Leader SMS.
Inteligencia artificial y análisis predictivo	Los sistemas de inteligencia artificial permiten identificar patrones complejos y extraer conocimiento de grandes volúmenes de datos; Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018) documentan su creciente uso en clasificación, regresión, procesamiento de imágenes y apoyo a la toma de decisiones en agricultura.	Se aplican en la predicción de rendimiento, la clasificación de zonas de manejo, la detección de enfermedades y el análisis de imágenes agrícolas, como señalan Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018).

Fuente: Esta investigación

Ejemplos representativos de la aplicación de estas estrategias incluyen el uso de sensores de conductividad eléctrica del suelo para delimitar zonas de manejo en campos heterogéneos, como ocurre con frecuencia en plantaciones de caña de azúcar o en viñedos. De acuerdo con Kitchen et al. (2005), esta delimitación permite ajustar con mayor precisión la densidad de siembra, la profundidad de laboreo y las estrategias de riego, lo que se traduce en una mejor optimización de los recursos y en una mayor eficiencia productiva. En cultivos de alto valor económico, como café, aguacate y cacao, actualmente se emplean redes de sensores de humedad y temperatura combinadas con imágenes obtenidas por drones y con modelos climáticos, con el fin de anticipar la aparición de plagas, como la broca, o de enfermedades, como la moniliasis. Según Pantazi et al. (2016), esta capacidad predictiva ha alcanzado niveles de efectividad superiores al 85% en la detección de brotes, permitiendo intervenciones preventivas que reducen de manera importante las pérdidas. En sistemas agroforestales y silvopastoriles, las estrategias basadas en datos también empiezan a consolidarse mediante el uso de sensores acústicos para el conteo de insectos benéficos y polinizadores, así como cámaras trampa automatizadas para el monitoreo de la fauna asociada, lo que favorece el diseño de manejos orientados a fortalecer la biodiversidad funcional del sistema productivo.

4. Desafíos y oportunidades en el análisis de datos para la toma de decisiones

La incorporación de datos en la AP, aunque ofrece un alto potencial para optimizar los sistemas productivos, también plantea una serie de desafíos que deben ser analizados con detenimiento por los profesionales de la ingeniería agrícola y áreas afines. Superar estas limitaciones es fundamental para materializar de manera efectiva los beneficios técnicos, económicos y ambientales que se esperan de este enfoque. Entre los principales retos se encuentran la calidad y estandarización de los datos, la interoperabilidad entre plataformas tecnológicas, la capacidad de procesamiento de grandes volúmenes de información, los costos de implementación y la formación de

talento humano con competencias interdisciplinarias. Sin embargo, estos desafíos también representan oportunidades estratégicas para fortalecer la innovación, promover la transformación digital del agro y avanzar hacia sistemas de producción más eficientes, resilientes y sostenibles (ver tabla 3).

Tabla 3. *Principales desafíos para la implementación de la AP*

Desafío técnico	Descripción con autores citados dentro del texto	Implicación para la implementación
Heterogeneidad y estandarización de los datos	Wolfert, Ge, Verdouw y Bogaardt (2017) explican que la agricultura digital integra datos de múltiples fuentes, escalas y formatos, mientras que la GAO (2024) señala que la ausencia de estándares uniformes dificulta la interoperabilidad entre tecnologías y plataformas.	La integración de datos de sensores, drones, satélites, maquinaria y estaciones meteorológicas exige procesos de armonización, estandarización y compatibilidad antes del análisis agronómico.
Volumen y calidad del Big Data agrícola	Gebbers y Adamchuk (2010) muestran que la AP depende de un flujo continuo de datos para optimizar decisiones, y Kamilaris, Kartakoullis y Prenafeta-Boldú (2017) subrayan que el Big Data agrícola enfrenta retos asociados con volumen, variedad, velocidad y veracidad.	En términos prácticos, esto obliga a diseñar rutinas robustas de limpieza, validación, almacenamiento y control de calidad para evitar decisiones basadas en datos incompletos o inconsistentes. Esta es una inferencia técnica apoyada en los problemas de veracidad y manejo de grandes volúmenes descritos por esos autores.
Conectividad e infraestructura rural	Wolfert et al. (2017) vinculan el smart farming con flujos de datos y servicios digitales conectados, y Rodríguez y Rodríguez (2013) muestran que en América Latina la difusión de TIC agropecuarias enfrenta barreras de comparabilidad, acceso y capacidad institucional. Además, Puntel et al. (2023) reportan que en Sudamérica la conectividad figura entre las limitaciones más citadas para la adopción de agricultura digital.	Cuando la conectividad es limitada, muchas soluciones deben operar en modo offline, con sincronización diferida, almacenamiento local y diseños resilientes a interrupciones de red y energía.

Desafío técnico	Descripción con autores citados dentro del texto	Implicación para la implementación
Privacidad y seguridad de los datos	Wolfert et al. (2017) destacan que la gobernanza de datos, su propiedad y el intercambio entre actores son temas centrales del smart farming; en la misma línea, la GAO (2024) identifica los problemas de propiedad y compartición de datos como una barrera concreta para la adopción ampliada de estas tecnologías.	Por ello, los sistemas deben incorporar protocolos de ciberseguridad, control de accesos, trazabilidad y reglas claras sobre uso, almacenamiento y cesión de la información productiva.
Costo y acceso a la tecnología	La GAO (2024) advierte que los altos costos iniciales de adquisición pueden ser prohibitivos para productores con recursos limitados, y Puntel et al. (2023) encontraron en Sudamérica que el costo tecnológico es una de las restricciones más reportadas para la adopción de agricultura digital.	Esto refuerza la necesidad de soluciones escalables, modulares y de menor costo, especialmente para pequeños y medianos productores.
Brecha de conocimiento y capacitación	Puntel et al. (2023) identificaron la falta de capacitación y de habilidades en procesamiento, análisis e interpretación de datos como obstáculos frecuentes en Sudamérica, mientras que la GAO (2024) señala que la adopción también depende de apoyo institucional, educación y entrenamiento.	En consecuencia, la adopción efectiva de la AP requiere formación técnica, interfaces comprensibles, acompañamiento extensionista y materiales didácticos adaptados al contexto rural.

Fuente: Esta investigación

5. Oportunidades en el uso de datos en la agricultura de precisión

Los desafíos previamente delineados en el análisis de datos para la toma de decisiones en AP se traducen directamente en oportunidades significativas para la ingeniería y la innovación en el sector agropecuario, propiciando un avance hacia sistemas más eficientes y resilientes (ver tabla 4).

Tabla 4. *Oportunidades en el uso de datos en la AP*

Oportunidad	Descripción con autores citados dentro del texto	Proyección para la ingeniería y el sector agropecuario
Integración y plataformas analíticas	Gebbers y Adamchuk (2010) señalan que la AP mejora la eficiencia en el uso de insumos, mientras que Zhang et al. (2002) destacan la integración de información como eje central del manejo preciso.	Desarrollo de APIs, bases de datos, tableros analíticos y sistemas de soporte a la decisión para convertir datos agrícolas dispersos en información útil.
Sensores y robótica agrícola	Zhang et al. (2002) resaltan el papel de sensores, control y percepción remota, mientras que la FAO reconoce la automatización digital mediante GPS/GNSS, drones, robots e inteligencia artificial.	Diseño de sensores ópticos, electroquímicos y proximales, junto con robots para monitoreo, muestreo y aplicación diferenciada de insumos.
Modelado predictivo y decisiones automatizadas	Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018) documentan que el deep learning se aplica con éxito en problemas agrícolas de clasificación, predicción y diagnóstico.	Construcción de modelos para estimar rendimiento, estrés hídrico, deficiencias nutricionales y enfermedades, integrados a sistemas de riego, fertilización y alerta temprana.
Conectividad rural y edge computing	Las tecnologías LoRaWAN, LoRa y edge computing permiten ampliar la cobertura digital rural, reducir consumo energético y disminuir la dependencia de redes celulares.	Implementación de redes locales, procesamiento en borde y transmisión diferida para zonas con conectividad limitada.
Modelos de negocio y servicios de datos	Coble et al. (2018) plantean que el Big Data agrícola abre oportunidades analíticas en la cadena de valor, la sostenibilidad, la gestión y la política agrícola.	Creación de servicios de análisis, consultoría en AP, plataformas de suscripción, trazabilidad productiva y recomendaciones agronómicas para productores sin equipos propios.
Sostenibilidad y resiliencia climática	La FAO relaciona la agricultura climáticamente inteligente con sistemas productivos sostenibles, y Gebbers y Adamchuk (2010) vinculan la AP con el uso eficiente de insumos.	Desarrollo de sistemas que reduzcan desperdicios, optimicen agua y fertilizantes, fortalezcan la adaptación climática y favorezcan una agricultura más resiliente.

Fuente: Esta investigación

La AP, tal como se entiende en la actualidad, es una disciplina esencialmente impulsada por datos. Su valor no radica únicamente en disponer de tecnologías avanzadas, como sensores remotos, drones o maquinaria equipada con GPS, sino en la capacidad técnica y analítica para transformar información bruta en conocimiento útil para la toma de decisiones. Ese conocimiento es el que sustenta decisiones estratégicas y diferenciadas en campo. Para ingenieros agrónomos, forestales y ambientales, comprender el ciclo completo de los datos, desde su recolección y estandarización hasta su análisis e interpretación visual, resulta fundamental para el éxito de cualquier iniciativa de AP. Esta visión coincide con lo expuesto por Gebbers y Adamchuk (2010), quienes destacan que la AP depende de la conversión de datos espaciales y temporales en acciones agronómicas concretas.

La influencia de los datos en la toma de decisiones por parte de agricultores y productores constituye uno de los pilares centrales de la AP. Históricamente, muchas decisiones de manejo se apoyaban en observaciones empíricas y saberes acumulados, bajo el supuesto de una homogeneidad que rara vez existe en los sistemas de producción. Sin embargo, el análisis de datos geoespaciales y multivariables permite cuantificar con mayor precisión la variabilidad del suelo, del cultivo y del ambiente circundante. Esa comprensión facilita la aplicación diferenciada de insumos, la detección temprana de estrés biótico o abiótico, la optimización de la planificación de siembra y cosecha, y la gestión preventiva del riesgo. Por ejemplo, un mapa de variabilidad de conductividad eléctrica del suelo, interpretado a partir de relaciones con propiedades edáficas, puede convertirse en un insumo técnico valioso para delimitar zonas de manejo y orientar aplicaciones diferenciadas. Sudduth et al. (2005) mostraron precisamente que la conductividad eléctrica aparente se relaciona con propiedades del suelo en diferentes ambientes agrícolas, mientras que Basso et al. (2016) documentaron que la fertilización nitrogenada a tasa variable puede reducir la lixiviación de nitratos y aumentar la rentabilidad frente a esquemas uniformes.

En un contexto global marcado por la variabilidad climática y por una demanda creciente de alimentos, la gestión basada en datos se consolida como una herramienta indispensable para mejorar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas agropecuarios. En este proceso, los ingenieros cumplen un papel central, ya que diseñan sistemas de adquisición de información, desarrollan modelos de análisis predictivo y construyen interfaces que traducen la complejidad técnica en recomendaciones prácticas para el productor. En consecuencia, la precisión en la toma de decisiones, sustentada en un uso inteligente y ético de los datos, es lo que convierte la AP en una realidad operativa y rentable, con efectos positivos sobre la eficiencia en el uso de los recursos y la capacidad de adaptación del sector frente a desafíos futuros.

Síntesis final

Este capítulo permitió comprender que la AP no se define únicamente por la incorporación de tecnologías avanzadas, sino por la capacidad de convertir datos dispersos en decisiones agronómicas concretas, oportunas y territorialmente diferenciadas. A lo largo del capítulo se evidenció que el verdadero valor de sensores, drones, imágenes satelitales, sistemas GPS/GNSS, plataformas digitales y modelos analíticos reside en su articulación dentro de un proceso técnico de recolección, organización, análisis e interpretación de información. En este sentido, como señalaron Pierce y Nowak (1999), Zhang et al. (2002) y Gebbers y Adamchuk (2010), la AP se sustenta en el reconocimiento de la variabilidad espacial y temporal del agroecosistema, y en la posibilidad de intervenirlo de manera específica para mejorar la eficiencia del uso de los recursos.

De igual forma, el capítulo mostró que los sistemas de información geográfica constituyen una base estructural para el análisis espacial de los sistemas productivos, ya que permiten integrar información climática, edáfica, topográfica, fisiológica y productiva en representaciones cartográficas útiles para la toma de decisiones. Esta capacidad es especialmente relevante en cultivos perennes y sistemas complejos, donde

la heterogeneidad del terreno, la disponibilidad hídrica, la presencia de plagas y la dinámica del paisaje condicionan la productividad y la sostenibilidad. A su vez, el análisis multivariable amplía la comprensión del agroecosistema al permitir estudiar simultáneamente múltiples factores interdependientes, identificar patrones ocultos, delimitar zonas de manejo y generar predicciones más robustas, tal como lo sustentan Hotelling (1933), Fisher (1936), Khosla (2010) y Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018).

Otro aporte central del capítulo fue mostrar que las estrategias de manejo basadas en datos representan una transición desde esquemas generalizados hacia decisiones agronómicas ajustadas a las condiciones específicas de cada sitio. Este enfoque mejora la precisión en la fertilización, el riego, el control fitosanitario, la planificación de labores y el monitoreo del cultivo, al tiempo que reduce costos, pérdidas de insumos e impactos ambientales. En consecuencia, la AP se consolida como una herramienta clave para avanzar hacia sistemas agropecuarios más sostenibles, resilientes y rentables, especialmente en escenarios marcados por la variabilidad climática, la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de incrementar la productividad con mayor responsabilidad ambiental, como también lo reconocieron Wolfert et al. (2017).

Finalmente, el capítulo dejó claro que el futuro de la AP dependerá no solo del desarrollo tecnológico, sino también de la capacidad institucional, profesional y formativa para interpretar los datos con criterio agronómico, ecológico y ético. El desafío no consiste únicamente en generar más información, sino en garantizar su calidad, interoperabilidad, accesibilidad y utilidad para el productor. Por ello, la formación de profesionales con competencias interdisciplinarias en agronomía, estadística, análisis espacial, modelación e inteligencia artificial será determinante para consolidar una agricultura basada en evidencia. En síntesis, el capítulo 6 reafirma que la gestión inteligente de los datos constituye uno de los pilares más sólidos para transformar la producción agropecuaria contemporánea y orientar su evolución hacia modelos más eficientes, adaptativos y sostenibles.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1: Análisis de un caso de estudio de variabilidad espacial (SIG y datos multivariables)

Contexto: Usted es consultor/a para una finca cafetera en la región del Eje Cafetero, Colombia, que busca optimizar su producción. Han notado una variabilidad significativa en el rendimiento y la calidad del café dentro de sus lotes.

Objetivo: Proponer una estrategia de análisis de datos para identificar y caracterizar estas zonas de variabilidad.

Actividades:

1. **Identificación de fuentes de datos:** ¿Qué tipos de datos geoespaciales y no geoespaciales (al menos 5) recopilaría para comprender esta variabilidad en el cultivo de café? Piense en datos relacionados con el suelo, el cultivo y el clima.

2. **Tecnologías de recopilación:** Para cada tipo de dato identificado, especifique qué tecnologías o sensores (mencionados en el capítulo u otros que conozca) utilizaría para su recolección.

3. **Aplicación de SIG:** Describa cómo utilizaría un SIG (mencione un software específico, ej., QGIS o ArcGIS) para integrar y visualizar estos datos. ¿Qué tipo de mapas generaría (ej., mapas de rendimiento, de nutrientes, topográficos – Justifique con criterio técnico su respuesta)?

4. **Análisis multivariable:** Una vez que tiene los datos integrados en el SIG, ¿qué técnicas de análisis multivariable (ej., PCA, clustering) aplicaría para delinear zonas de manejo homogéneas dentro de la finca? Explique brevemente por qué elegiría esa técnica.

5. **Discusión:** ¿Qué desafíos específicos de conectividad e infraestructura (considerando la ubicación) podrían surgir al implementar esta estrategia de recopilación de datos, y cómo los abordaría como ingeniero/a? ¿Qué beneficios ambientales y económicos esperaría lograr al optimizar la gestión de esta finca cafetera a través del análisis de datos?

Ejercicio 2: Diseño de un sistema de monitoreo fitosanitario con drones (estrategias basadas en datos)

Contexto: Una plantación de aguacate está experimentando brotes recurrentes de una enfermedad foliar que afecta significativamente la productividad. El objetivo es implementar un sistema de monitoreo temprano y aplicación localizada.

Objetivo: Diseñar una estrategia de manejo basada en datos para el control fitosanitario.

Actividades:

1. **Selección de sensores:** ¿Qué tipo de sensor (ej., multiespectral, hiperespectral, RGB) montaría en un drone para detectar tempranamente la enfermedad en las hojas de aguacate? Justifique su elección explicando qué parámetros mediría el sensor y cómo se relacionarían con la enfermedad.

2. **Planificación del vuelo del drone:** ¿Qué factores técnicos consideraría al planificar los vuelos del drone para asegurar una cobertura óptima y la calidad de los datos (ej., altura de vuelo, solape de imágenes, condiciones de luz)?

3. **Procesamiento de imágenes:** Una vez capturadas las imágenes, ¿qué software fotogramétrico utilizaría y qué productos generaría (ej., ortomosaicos, modelos de elevación digital, mapas de índices de vegetación)?

4. **Algoritmo de detección:** Describa cómo podría entrenar un algoritmo de aprendizaje automático (mencione un tipo, ej., Random Forest o Red Neuronal) para clasificar las zonas afectadas por la enfermedad a partir de los datos del drone. ¿Qué datos de «entrenamiento» necesitaría?

5. **Toma de decisiones y aplicación:** ¿Cómo se traducirían los mapas de detección de enfermedad en una estrategia de aplicación localizada de fungicidas? ¿Qué tipo de maquinaria o tecnología permitiría esta aplicación de precisión?

6. **Discusión:** ¿Qué consideraciones éticas surgen al recopilar datos detallados de las fincas con drones? ¿Cómo podría esta tecnología ser accesible para pequeños productores de aguacate en Colombia, y qué oportunidades de modelos de negocio se abren a partir de este servicio?

Ejercicio 3: Optimización del riego con análisis multivariable y sensores (impacto ambiental)

Contexto: Una cooperativa de agricultores de hortalizas en el Valle del Cauca, Colombia, busca reducir su consumo de agua y mejorar la eficiencia del riego en sus cultivos de tomate.

Objetivo: Desarrollar una estrategia de optimización del riego basada en el análisis de datos.

Actividades:

1. **Variables críticas:** Identifique al menos 4 variables (relacionadas con el suelo, el cultivo y el clima) que son cruciales para determinar las necesidades hídricas de un cultivo de tomate.

2. **Sensores y ubicación:** ¿Qué tipo de sensores in situ (ej., sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas) y/o remotos (ej.,

imágenes satelitales) instalaría? ¿Cómo determinaría la ubicación óptima de estos sensores dentro de las parcelas para capturar la variabilidad?

3. **Análisis multivariable para la programación del riego:** Explique cómo el análisis multivariable (ej., regresión múltiple o modelos de machine learning) podría integrar los datos de estos sensores para generar recomendaciones de riego precisas (cuándo y cuánto regar).

4. **Sistema de riego de precisión:** ¿Qué tipo de sistema de riego permitiría implementar estas recomendaciones de manera variable (ej., riego por goteo con válvulas automatizadas)?

5. **Discusión:** Además de la reducción del consumo de agua, ¿qué otros beneficios ambientales (ej., menor lixiviación de nutrientes, reducción de enfermedades) y económicos (ej., ahorro de energía, mayor rendimiento) se derivarían de esta estrategia? ¿Cuáles son los desafíos técnicos para asegurar la confiabilidad de los datos en tiempo real y la automatización del riego en una operación hortícola?

Ejercicio 4: Desafíos y oportunidades en la estandarización de datos

Contexto: Imagine que usted es parte de un comité técnico encargado de proponer estándares nacionales para los datos en AP en Colombia.

Objetivo: Debatir sobre los desafíos y proponer soluciones para la estandarización de datos.

Actividades de Discusión:

1. **Identificación de problemas:** Discuta en grupos pequeños los principales problemas que surgen de la falta de estandarización en los datos agrícolas (ej., incompatibilidad entre plataformas, dificultad para compartir datos, errores en el análisis).

2. **Tipos de estándares necesarios:** ¿Qué tipos de estándares se necesitarían? (ej., para formatos de archivo, unidades de medida, metadatos, protocolos de comunicación). Cite ejemplos de estándares existentes en otras industrias que podrían servir de inspiración.

3. **Roles de los actores:** ¿Qué roles deberían jugar los diferentes actores (gobierno, universidades, empresas de tecnología, agricultores, gremios) en el desarrollo e implementación de estos estándares?

4. **Beneficios de la estandarización:** ¿Cómo la estandarización de los datos podría impulsar la adopción de la AP, facilitar la investigación y promover la innovación en el sector agropecuario colombiano?

5. **Desafíos para el ingeniero:** ¿Qué habilidades adicionales necesitarían los ingenieros para trabajar eficazmente en un entorno de datos estandarizados, y cómo pueden contribuir activamente a la creación e implementación de estos estándares?

Ejercicio 5: Aplicación de AP en contextos forestales y ambientales

Contexto: Los principios de la AP (análisis de datos, SIG, monitoreo remoto) son altamente aplicables más allá de los cultivos agrícolas tradicionales.

Objetivo: Explorar aplicaciones de AP en ingeniería forestal y gestión ambiental.

Actividades:

1. **Monitoreo forestal:** ¿Cómo se podrían utilizar los drones y las imágenes satelitales (mencionando tipos de sensores específicos como LiDAR o hiperespectral) para monitorear la salud de un bosque, detectar enfermedades o plagas, o evaluar la biomasa forestal para estimar el secuestro de carbono?

2. **Gestión de recursos hídricos:** ¿Qué datos y tecnologías de AP serían útiles para monitorear y gestionar cuencas hidrográficas, evaluar la calidad del agua, o predecir la disponibilidad hídrica en zonas de alta montaña?

3. **Conservación de la biodiversidad:** ¿Cómo podrían los datos geoespaciales y el análisis multivariable apoyar la identificación de corredores biológicos, el monitoreo de especies o la planificación de estrategias de conservación en áreas protegidas?

4. **Toma de decisiones en restauración ecológica:** Describa cómo los datos de AP podrían guiar decisiones sobre la selección de especies, la preparación del sitio y el monitoreo del éxito en proyectos de restauración de ecosistemas degradados.

5. **Discusión:** ¿Cuáles son los desafíos éticos y de gobernanza de datos cuando se aplican estas tecnologías en ecosistemas sensibles o comunidades locales? ¿Cómo la perspectiva de la ingeniería ambiental complementa a la agronómica y forestal en el uso de datos para la sostenibilidad?

Referencias

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 44(1), 71–91. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002

Adebayo, S. E., Hashim, N., Hass, R., Reich, O., Regen, C., Münzberg, M., Abdan, K., Hanafi, M., & Zude-Sasse, M. (2017). Using absorption and reduced scattering coefficients for non-destructive analyses of fruit flesh firmness and soluble solids content in pear (Pyrus communis 'Conference')—An update when using diffusion theory. Postharvest Biology and Technology, 130, 56–63. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.04.004

Ag Leader. (2025). SMS software. https://www.agleader.com/sms-software/

Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2016). Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. Science of the Total Environment, 545–546, 227–235. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.104

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. Precision Agriculture, 5, 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

Bueno, I. T., Antunes, J. F. G., dos Reis, A. A., Werner, J. P. S., Toro, A. P. S. G. D. D., Figueiredo, G. K. D. A., Esquerdo, J. C. D. M., Lamparelli, R. A. C., Coutinho, A. C., & Magalhães, P. S. G. (2023). Mapping integrated crop-livestock systems in Brazil with PlanetScope time series and deep learning. Remote Sensing of Environment, 299, 113886. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113886

Bullock, D. S., & Lowenberg-DeBoer, J. (2007). Using spatial analysis to study the values of variable rate technology and information. Journal of Agricultural Economics, 58(3), 517–535. https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2007.00116.x

Chemura, A., Mutanga, O., & Dube, T. (2017). Remote sensing leaf water stress in coffee (Coffea arabica) using secondary effects of water absorption and random forests. Physics and Chemistry of the Earth, 100, 317–324. https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.011

Climate FieldView. (2024). Climate FieldView: Maximize results with our digital farming solution. https://climate.com/en-us.html

Coble, K. H., Mishra, A. K., Ferrell, S., & Griffin, T. (2018). Big data in agriculture: A challenge for the future. Applied Economic Perspectives and Policy, 40(1), 79–96. https://doi.org/10.1093/aepp/ppx056

Fisher, R. A. (1936). The use of multiple measurements in taxonomic problems. Annals of Eugenics, 7(2), 179–188. https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Climate-smart agriculture sourcebook. https://www.fao.org/3/i3325e/i3325e.pdf

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. Journal of Plant Physiology, 160(3), 271–282. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887

Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B., & Louis, J. (2002). Optical remote sensing applications in viticulture: A review. Australian Journal of Grape and Wine Research, 8(1), 36–47. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2002.tb00209.x

Hotelling, H. (1933a). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology, 24(6), 417–441. https://doi.org/10.1037/h0071325

Hotelling, H. (1933b). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology, 24(7), 498–520. https://doi.org/10.1037/h0070888

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295–309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Jensen, J. R. (2007). Remote sensing of the environment: An earth resource perspective (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

John Deere. (2025). Operations Center. https://www.deere.com/latin-america/es/agricultura-de-precisi%C3%B3n/gerenciamiento-de-informaci%C3%B3n/operations-center/

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 18(3–4), 235–265. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture, 147, 70–90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016

Khosla, R. (2010). Precision agriculture: Challenges and opportunities in a flat world. En 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World (pp. 26–29). Brisbane, Australia.

Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., & Hong, S. Y. (2005). Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1–3), 285–308. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012

Lamb, D. W., Frazier, P., & Adams, P. (2008). Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 61(1), 4–9. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.009

Lambert, D. M., Lowenberg-DeBoer, J., & Malzer, G. L. (2006). Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. Agronomy Journal, 98(1), 43–54. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0005

López, F. J. (2019). Laser y GPS para caña [Presentación de PowerPoint]. Pleno Nacional de Dirigentes UNC, Querétaro, México. Unión Nacional de Cañeros A.C.

Lowenberg-DeBoer, J. (2018). The economics of precision agriculture. En J. V. Stafford (Ed.), Precision agriculture for sustainability (pp. 461–494). Burleigh Dodds Science Publishing. https://doi.org/10.19103/AS.2017.0032.19

Lowenberg-DeBoer, J., & Swinton, S. M. (1997). Economics of site-specific management in agronomic crops. En F. J. Pierce & E. J. Sadler (Eds.),

The state of site-specific management for agriculture (pp. 369–396). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Mallarino, A. P., & Wittry, D. J. (2004). Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. Precision Agriculture, 5, 131–144. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000022358.24102.1b

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). El desarrollo rural en cifras: 1. Principales características sociales de la población en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Unión Europea. https://www.agronet.gov.co/agroclima/Documents/cartilla.pdf

Molin, J. P., Amaral, L. R., & Colaço, A. F. (2015). Agricultura de precisão. Oficina de Textos.

Moral, F. J., Terrón, J. M., & Da Silva, J. R. M. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. Computers and Electronics in Agriculture, 70(2), 373–381. https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.003

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. Environmental Research Letters, 15(10), 104085. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053

Pantazi, X. E., Moshou, D., & Bravo, C. (2016). Active learning system for weed species recognition based on hyperspectral sensing. Biosystems Engineering, 146, 193–202. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.014

Pantazi, X. E., Moshou, D., & Tamouridou, A. A. (2019). Automated leaf disease detection in different crop species through image features analysis and one class classifiers. Computers and Electronics in Agriculture, 156, 96–104. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.005

Pérez-Castro, A., Sánchez-Molina, J. A., Castilla, M., Sánchez-Moreno, J., Moreno-Úbeda, J. C., & Magán, J. J. (2017). cFertigUAL: A fertigation management app for greenhouse vegetable crops. Agricultural Water Management, 183, 186–193. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.013

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. Advances in Agronomy, 67, 1–85. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1

PotatoPro. (2018, 4 de octubre). Mapping and evaluating the health of potato fields based on satellite data. https://www.potatopro.com/news/2018/mapping-and-evaluating-health-potato-fields-based-satellite-data

Puntel, L. A., Bolfe, É. L., Melchiori, R. J. M., Ortega, R., Tiscornia, G., Roel, A., Scaramuzza, F., Best, S., Berger, A. G., Hansel, D. S. S., Palacios Durán, D., & Balboa, G. R. (2023). How digital is agriculture in a subset of countries from South America? Adoption and limitations. Crop & Pasture Science, 74(6), 555–572. https://doi.org/10.1071/CP21759

Rodrigues, M., & Rodríguez, A. (Coords.). (2013). Information and communication technologies for agricultural development in Latin America: Trends, barriers and policies. Economic Commission for Latin America and the Caribbean. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/7300b859-4f93-4b0c-9a6d-d085ea8576b0/content

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En S. C. Freden, E. P. Mercanti, & M. A. Becker (Eds.), Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Volume I. Technical presentations (NASA SP-351, pp. 309–317). National Aeronautics and Space Administration.

Santana, L. S., Ferraz, G. A. e S., Santos, S. A. dos, & Dias, J. E. L. (2022). Precision coffee growing: A review. Coffee Science, 17, e172007. https://doi.org/10.25186/.v17i.2007

Schimmelpfennig, D. (2016). Farm profits and adoption of precision agriculture (Economic Research Report No. 217). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.

Shahhosseini, M., Hu, G., Huber, I., & Archontoulis, S. V. (2021). Coupling machine learning and crop modeling improves crop yield prediction in the US Corn Belt. Scientific Reports, 11, Article 1606. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80820-1

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3), 426–437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D. E., Palm, H. L., Pierce, F. J., Schuler, R. T., & Thelen, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1–3), 263–283. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.010

Tomlinson, R. F. (1967). An introduction to the geo-information system of the Canada Land Inventory. Canada Department of Forestry and Rural Development.

U.S. Government Accountability Office. (2024). Precision agriculture: Benefits and challenges for technology adoption and use (GAO-24-105962). https://www.gao.gov/products/gao-24-105962

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming: A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2–3), 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

Zude-Sasse, M., Fountas, S., Gemtos, T. A., & Abu-Khalaf, N. (2016). Applications of precision agriculture in horticultural crops. European Journal of Horticultural Science, 81(2), 78–90. https://doi.org/10.17660/eJHS.2016/81.2.2

Capítulo 7

Fertilización y Manejo de Nutrientes de Forma Variable



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. Comprender los fundamentos de la fertilización y el manejo variable de nutrientes como estrategia central de la AP para ajustar las dosis de insumos según la variabilidad del suelo, del cultivo y del ambiente.

2. Analizar la importancia del manejo sitio-específico de nutrientes para optimizar la aplicación de nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos esenciales, evitando aplicaciones uniformes que puedan generar desperdicio, baja eficiencia o impactos ambientales.

3. Identificar los principales métodos de fertilización a tasa variable, incluyendo enfoques basados en mapas, sensores, imágenes satelitales, drones, análisis de suelo georreferenciado, mapas de rendimiento y modelos predictivos.

4. Interpretar mapas de fertilidad, mapas de variabilidad, mapas de rendimiento y mapas de prescripción como herramientas técnicas para definir zonas de manejo y orientar la aplicación diferenciada de fertilizantes.

5. Relacionar el uso de sensores proximales, sensores remotos, plataformas SIG, GPS/GNSS/RTK e Internet de las Cosas con la generación de recomendaciones nutricionales más precisas, oportunas y adaptadas a las condiciones reales del lote.

6. Evaluar los beneficios agronómicos, económicos y ambientales de la fertilización variable, considerando la eficiencia en el uso de nutrientes, la reducción de pérdidas por lixiviación, volatilización o escorrentía, y la mejora de la rentabilidad del sistema productivo.

7. Reconocer el papel de la maquinaria agrícola, los controladores electrónicos, las fertilizadoras de tasa variable y los sistemas de aplicación automatizada como medios para ejecutar en campo las recomendaciones derivadas del análisis de datos.

8. Valorar críticamente los desafíos de implementar la fertilización variable en diferentes contextos productivos, considerando costos, capacitación técnica, conectividad, calidad de datos, disponibilidad tecnológica y adaptación a pequeños y medianos productores.

Conceptos clave

- Fertilización variable: Estrategia de manejo nutricional que permite aplicar diferentes dosis de fertilizantes dentro de un mismo lote, según la variabilidad del suelo, el estado del cultivo y el potencial productivo de cada zona.

- Manejo de nutrientes de forma variable: Proceso técnico que ajusta la aplicación de nitrógeno, fósforo, potasio, micronutrientes y enmiendas de acuerdo con las necesidades específicas de cada área del predio.

- Aplicación a tasa variable: Tecnología que modifica automáticamente la cantidad de fertilizante aplicado durante la labor agrícola, con base en mapas de prescripción, sensores o datos geoespaciales.

- VRT: Sigla en inglés de Variable Rate Technology, utilizada para referirse a las tecnologías de aplicación variable de insumos agrícolas, como fertilizantes, semillas, agua o productos fitosanitarios.

- Manejo sitio-específico de nutrientes: Enfoque agronómico que reconoce que el suelo y el cultivo no son homogéneos, por lo cual las recomendaciones de fertilización deben ajustarse a las condiciones particulares de cada zona del lote.

- Variabilidad nutricional del suelo: Diferencias espaciales en la disponibilidad de nutrientes, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, textura, humedad y otros factores que influyen en la respuesta del cultivo a la fertilización.

- Ley del mínimo: Principio de nutrición vegetal según el cual el crecimiento del cultivo está limitado por el nutriente esencial que se encuentra en menor disponibilidad relativa frente a los requerimientos de la planta.

- Nutriente limitante: Elemento mineral cuya baja disponibilidad restringe el crecimiento, desarrollo o rendimiento del cultivo, aun cuando los demás nutrientes se encuentren en niveles adecuados.

- Macronutrientes: Elementos requeridos por las plantas en mayores cantidades, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, fundamentales para el crecimiento, la fotosíntesis, la formación de tejidos y la producción.

- Micronutrientes: Elementos esenciales requeridos en pequeñas cantidades, como hierro, zinc, manganeso, cobre, boro, molibdeno, cloro y níquel, necesarios para procesos fisiológicos, enzimáticos y metabólicos del cultivo.

- Nitrógeno: Nutriente esencial asociado al crecimiento vegetativo, la síntesis de proteínas, la formación de clorofila y la actividad fotosintética; suele ser uno de los elementos más manejados mediante fertilización variable.

- Fósforo: Nutriente clave para el desarrollo radicular, la transferencia de energía, la floración y la formación de estructuras reproductivas; su disponibilidad está fuertemente influenciada por el pH del suelo.

- Potasio: Elemento fundamental para la regulación osmótica, la apertura estomática, el transporte de fotoasimilados, la tolerancia al estrés y la calidad de la producción agrícola.

- Eficiencia en el uso de nutrientes: Capacidad del cultivo para absorber, utilizar y transformar los nutrientes aplicados en biomasa, rendimiento o calidad del producto, reduciendo pérdidas y desperdicios.

- Fertilización uniforme: Aplicación de una misma dosis de fertilizante en todo el lote, sin considerar la variabilidad espacial del suelo o del cultivo, lo que puede generar sobreaplicación en unas zonas y deficiencias en otras.

- Fertilización basada en mapas: Método de fertilización variable que utiliza mapas de prescripción construidos a partir de análisis de suelo, mapas de rendimiento, imágenes remotas, sensores y otras capas georreferenciadas.

- Fertilización basada en sensores: Enfoque que utiliza sensores ópticos, proximales o de reflectancia para estimar en tiempo real el estado nutricional del cultivo y ajustar dinámicamente la dosis de fertilizante durante la aplicación.

- Fertilización basada en imágenes satelitales: Método que emplea imágenes de satélite, índices de vegetación y datos geoespaciales para identificar diferencias de vigor, biomasa o demanda nutricional y orientar la aplicación diferenciada de fertilizantes.

- Mapa de fertilidad: Representación espacial de variables químicas del suelo, como pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, micronutrientes o conductividad eléctrica, útil para orientar decisiones de fertilización.

- Mapa de prescripción: Documento digital georreferenciado que indica la dosis de fertilizante o enmienda que debe aplicarse en cada zona del lote, según los análisis técnicos realizados.

- Zona de manejo: Área relativamente homogénea dentro del predio, definida a partir de características de suelo, rendimiento, topografía, vigor del cultivo o disponibilidad de nutrientes, que recibe una recomendación diferenciada.

- Muestreo georreferenciado de suelo: Procedimiento de toma de muestras con coordenadas espaciales precisas, indispensable para construir mapas de fertilidad y diseñar recomendaciones de fertilización variable.

- Conductividad eléctrica aparente: Variable relacionada con textura, humedad, salinidad, arcilla y materia orgánica del suelo, utilizada para identificar patrones de variabilidad y apoyar la delimitación de zonas de manejo.

- Índices de vegetación: Relaciones matemáticas derivadas de imágenes multiespectrales o satelitales, empleadas para estimar vigor, biomasa, contenido de clorofila y posibles diferencias nutricionales del cultivo.

- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada utilizado para evaluar vigor vegetal y actividad fotosintética, útil como apoyo para identificar zonas con diferente respuesta nutricional.

- NDRE: Índice basado en el borde rojo, sensible a cambios en el contenido de clorofila y útil para evaluar el estado nutricional del cultivo, especialmente en etapas avanzadas donde el NDVI puede saturarse.

- Sensor óptico: Dispositivo que mide la reflectancia del cultivo en diferentes bandas del espectro electromagnético, permitiendo estimar vigor, clorofila, biomasa y estado nutricional.

- Sensor proximal: Equipo ubicado cerca del suelo o del cultivo que permite medir variables como conductividad eléctrica, humedad, reflectancia, vigor vegetal o propiedades edáficas, sin depender exclusivamente de imágenes satelitales.

- Teledetección nutricional: Uso de sensores remotos, drones o satélites para identificar patrones espaciales asociados al estado nutricional del cultivo y apoyar decisiones de fertilización.

- Dron multiespectral: Plataforma aérea no tripulada equipada con sensores capaces de captar bandas espectrales útiles para evaluar vigor, estrés, biomasa y posibles deficiencias nutricionales.

- GPS/GNSS/RTK: Sistemas de posicionamiento global y corrección de alta precisión que permiten ubicar maquinaria, puntos de muestreo, zonas de manejo y aplicaciones de fertilizante con exactitud espacial.

- Fertilizadora de tasa variable: Equipo agrícola capaz de modificar la dosis de fertilizante durante la aplicación, de acuerdo con mapas de prescripción, sensores en tiempo real o instrucciones de un controlador electrónico.

- Controlador electrónico: Dispositivo instalado en la maquinaria agrícola que regula automáticamente la dosis de fertilizante, la apertura de compuertas, el caudal o la velocidad de aplicación según la prescripción definida.

- Computador de abordo: Sistema instalado en la maquinaria que recibe mapas, coordenadas y datos de operación, permitiendo ejecutar aplicaciones variables y registrar la labor realizada.

- Calibración de equipos: Proceso técnico necesario para asegurar que la maquinaria aplique la dosis correcta de fertilizante en cada zona del lote, evitando errores de sobredosificación o subdosificación.

- Lixiviación de nutrientes: Pérdida de nutrientes por arrastre hacia capas profundas del suelo, especialmente nitratos, lo que reduce la eficiencia de fertilización y puede contaminar aguas subterráneas.

- Volatilización: Pérdida de nutrientes hacia la atmósfera, principalmente nitrógeno en forma de amoníaco, asociada a condiciones de manejo, humedad, temperatura y tipo de fertilizante.

- Escorrentía de nutrientes: Transporte superficial de fertilizantes hacia cuerpos de agua durante eventos de lluvia o riego excesivo, con riesgo de contaminación y eutrofización.

- Enmienda agrícola: Material aplicado al suelo para corregir limitaciones químicas, físicas o biológicas, como cal agrícola, yeso, materia orgánica, compost o biochar.

- Aplicación variable de cal: Estrategia que ajusta la dosis de encalado según la acidez del suelo, la saturación de aluminio, el pH y las necesidades específicas de cada zona.

- Balance nutricional: Relación entre los nutrientes disponibles, los nutrientes aplicados y los nutrientes extraídos por el cultivo, utilizada para evitar deficiencias, excesos o desbalances.

- Requerimiento nutricional del cultivo: Cantidad de nutrientes que necesita una especie vegetal para completar su ciclo, alcanzar un rendimiento esperado y mantener una adecuada calidad productiva.

- Potencial de rendimiento: Capacidad productiva esperada de una zona del lote en función de sus condiciones de suelo, clima, topografía, manejo y respuesta histórica del cultivo.

- Mapa de rendimiento: Representación georreferenciada de la productividad obtenida en la cosecha, útil para identificar zonas de alto, medio y bajo desempeño y ajustar la fertilización del siguiente ciclo.

- Modelo predictivo nutricional: Herramienta estadística o computacional que integra datos de suelo, clima, cultivo, rendimiento e imágenes para estimar necesidades de fertilización o respuesta probable a los nutrientes.

- Sistema de soporte a la decisión: Plataforma o herramienta que integra datos, modelos y criterios agronómicos para recomendar dosis, momentos y zonas de aplicación de fertilizantes.

- Retroalimentación post-aplicación: Evaluación posterior a la fertilización mediante sensores, imágenes, análisis de suelo o rendimiento, con el fin de verificar la respuesta del cultivo y ajustar futuras recomendaciones.

- Trazabilidad de la fertilización: Registro georreferenciado de dosis, fecha, producto, zona tratada, equipo utilizado y condiciones de aplicación, útil para auditoría técnica, sostenibilidad y mejora continua.

- Sostenibilidad nutricional: Manejo responsable de los nutrientes orientado a mantener la productividad del cultivo, conservar la fertilidad del suelo, reducir pérdidas ambientales y mejorar la eficiencia económica del sistema.

- Agricultura prescriptiva: Enfoque que utiliza datos, modelos y mapas para generar recomendaciones específicas de manejo, indicando qué aplicar, cuánto aplicar, dónde aplicar y cuándo intervenir.

- Rentabilidad de la fertilización variable: Relación entre los costos de implementar tecnologías de aplicación variable y los beneficios

obtenidos por ahorro de insumos, mejora del rendimiento, mayor eficiencia y reducción de pérdidas.

- Interoperabilidad tecnológica: Capacidad de sensores, maquinaria, plataformas digitales, mapas y controladores para compartir información y funcionar de manera integrada en el manejo variable de nutrientes.

- Manejo adaptativo de la fertilización: Proceso continuo de ajuste de las recomendaciones nutricionales con base en datos nuevos, respuesta del cultivo, condiciones climáticas y resultados productivos del ciclo anterior.

Desarrollo técnico

Fertilización y manejo de nutrientes de forma variable.

La fertilización y el manejo de nutrientes en la agricultura han experimentado una transformación profunda durante las últimas décadas. En este proceso, la aplicación de fertilizantes a tasa variable (VRT, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una de las herramientas más representativas de la AP, ya que permite ajustar espacialmente las dosis de nutrientes dentro de un mismo lote según la variabilidad del suelo, el comportamiento histórico del cultivo y otros datos georreferenciados. De esta manera, se optimiza el uso de los insumos, se mejora la eficiencia agronómica y se reducen los impactos ambientales asociados a la fertilización uniforme, como explicaron Gebbers y Adamchuk (2010) y Zhang, Wang y Wang (2002).

Las bases de la nutrición vegetal moderna se remontan al siglo XIX, cuando Justus von Liebig popularizó la denominada ley del mínimo, según la cual el crecimiento de la planta está condicionado por el nutriente esencial que se encuentra en menor disponibilidad relativa frente a sus requerimientos. Posteriormente, el desarrollo de la nutrición mineral de plantas y de los fertilizantes industriales transformó la producción agrícola,

aunque durante mucho tiempo predominó una fertilización uniforme que no consideraba la heterogeneidad intrínseca del suelo dentro del campo. Esa limitación histórica es precisamente una de las razones por las cuales surgieron enfoques de manejo sitio-específico, tal como lo analizaron van der Ploeg, Böhm y Kirkham (1999).

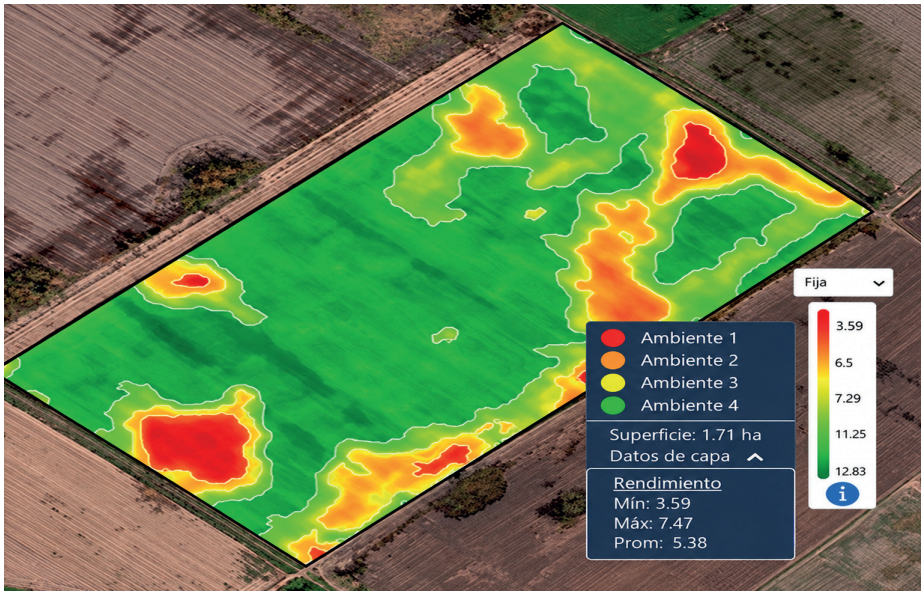
1. Métodos de fertilización variable

La fertilización variable puede implementarse mediante diferentes enfoques, cada uno con aplicaciones y requerimientos técnicos particulares.

a. Uno de los más utilizados es la fertilización a tasa variable basada en mapas (map-based VRT), que emplea mapas de prescripción elaborados a partir de muestreos de suelo georreferenciados, mapas de rendimiento, imágenes remotas y otras capas de información espacial. Estos mapas establecen dosis diferenciadas de fertilizante para distintas zonas de manejo dentro del lote. Como señalan Grisso et al. (2011), este método requiere una etapa previa de análisis técnico, generación de mapas y calibración del equipo, por lo que suele demandar mayor planificación, instrumentación y respaldo analítico. Sin embargo, su principal fortaleza radica en que permite una intervención más precisa y coherente con la variabilidad espacial del sistema productivo.

   Además, la delimitación de zonas de manejo a partir de variables como la conductividad eléctrica aparente del suelo, combinada con datos de rendimiento y muestreos específicos, ha demostrado ser útil para orientar la fertilización diferencial y otras decisiones agronómicas. En ese sentido, Johnson et al. (2003) mostraron que estas zonas pueden emplearse para definir estrategias de muestreo, establecer metas de rendimiento y construir mapas de prescripción más ajustados a las condiciones reales del terreno (ver figura 1).

Figura 1. *Zonificación de ambientes productivos a partir de datos de rendimiento en un lote agrícola*



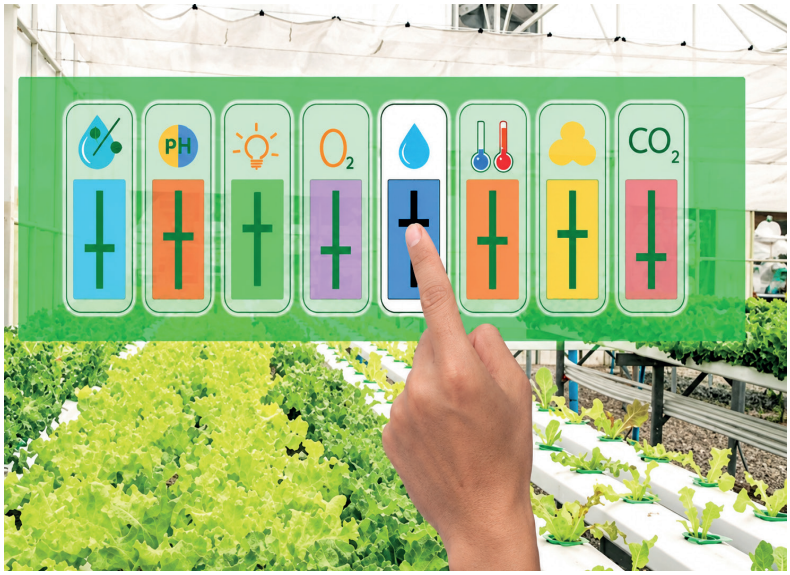
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de rendimiento procesados en una plataforma de AP.

b. Fertilización a tasa variable basada en sensores (sensor-based VRT): Este enfoque incorpora sensores ópticos y de infrarrojo cercano (NIR) instalados en la maquinaria agrícola o en plataformas de monitoreo proximal, los cuales permiten evaluar en tiempo real el estado nutricional del cultivo y, en algunos casos, ciertas propiedades del suelo. A partir de variables como el índice de verdor, la reflectancia del dosel y la estimación indirecta del contenido de clorofila, estos sistemas ajustan dinámicamente la dosis de fertilizante durante la aplicación, sin depender exclusivamente de mapas de prescripción elaborados con anterioridad.

   Como explicaron Raun et al. (2005), este tipo de tecnología mejora la precisión en la recomendación nitrogenada al combinar sensores

de reflectancia con algoritmos de respuesta del cultivo (ver figura 2), mientras que Padilla et al. (2018) señalaron que los sensores ópticos proximales permiten diagnosticar de forma rápida y no destructiva el estado nitrogenado de las plantas, favoreciendo decisiones más oportunas y eficientes. En consecuencia, la fertilización variable basada en sensores contribuye a incrementar la eficiencia en el uso de nutrientes y a reducir desperdicios y pérdidas ambientales asociadas a aplicaciones uniformes o sobre dosificadas.

Figura 2. *Aplicación de fertilización a tasa variable mediante sensores para el monitoreo de variables agronómicas*



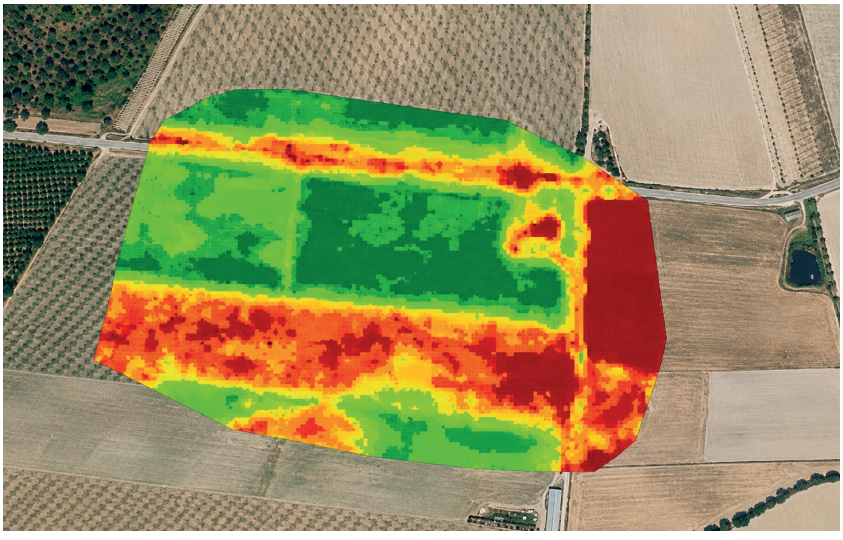
Fuentes: Esta investigación

c. Fertilización a tasa variable basada en imágenes satelitales y datos geoespaciales: Este método emplea imágenes satelitales y otras capas de información geoespacial para elaborar mapas de prescripción que orientan la aplicación diferencial de fertilizantes dentro del lote. Para ello, se integran datos de reflectancia, topografía, suelo, rendimiento histórico y, en algunos casos, información

climática, con el fin de identificar zonas con distinto comportamiento productivo y diferentes requerimientos nutricionales.

En este contexto, índices de vegetación como el NDVI (ver figura 3), desarrollado a partir de la relación entre bandas del rojo y del infrarrojo cercano, permiten detectar diferencias espaciales en el vigor del cultivo y apoyar la delimitación de áreas con posibles contrastes en la demanda de nutrientes. Como señalan Radočaj, Jurišić y Gašparović (2022), el uso de teledetección en la fertilización de precisión ha fortalecido notablemente la generación de mapas de prescripción, mientras que Rouse, Haas, Schell y Deering (1974) sentaron las bases del uso del NDVI estima la condición de la vegetación. En consecuencia, este enfoque favorece una aplicación más dirigida y eficiente de los fertilizantes, ajustada a la variabilidad espacial del sistema productivo.

Figura 3. *Fertilización a Tasa Variable Basada en Imágenes Satelitales y Datos Geoespaciales*



Fuentes: Esta investigación

2. Análisis comparativo de métodos y beneficios (ver tabla 1)

Tabla 1. *Principales beneficios de la fertilización a tasa variable*

Beneficio	Descripción	Implicación práctica
Eficiencia en el uso de fertilizantes	La fertilización a tasa variable permite una aplicación sitio-específica de los nutrientes, ajustando la dosis según las necesidades reales del cultivo y la variabilidad del suelo.	Disminuye el uso excesivo de fertilizantes, reduce pérdidas por lixiviación o escorrentía y contribuye a mitigar el impacto ambiental.
Rentabilidad económica	Aunque la adopción de esta tecnología implica una inversión inicial en equipos, software y análisis de datos, su implementación puede optimizar el uso de insumos y mejorar la productividad.	Favorece la reducción de costos de fertilización y puede generar un retorno de inversión positivo en el mediano y largo plazo.
Adaptabilidad a condiciones locales	La fertilización a tasa variable puede ajustarse a las características agroecológicas de cada predio, considerando factores como tipo de suelo, clima, topografía y requerimientos del cultivo.	Permite diseñar estrategias de manejo más precisas y pertinentes para cada lote, mejorando la eficiencia agronómica y la sostenibilidad del sistema productivo.

Fuentes: Esta investigación

3. Manejo de nutrientes en la agricultura contemporánea

El manejo eficiente de nutrientes es un componente esencial de la sostenibilidad agrícola, ya que condiciona simultáneamente la productividad, la rentabilidad y la conservación del suelo y del agua. En este contexto, la fertilización a tasa variable, combinada con herramientas de monitoreo, plataformas del Internet de las Cosas (IoT) y sistemas de soporte a decisiones, ha fortalecido la capacidad de ajustar las recomendaciones de fertilización a las condiciones reales del cultivo y del ambiente. Como señalan Kumar et al. (2024), la integración de sensores, conectividad y analítica digital permite un seguimiento más oportuno del sistema productivo, mientras que Xu et al. (2014) mostraron que los sistemas de recomendación sitio-específica pueden mantener el rendimiento y la rentabilidad, al tiempo que mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes.

4. Ejemplos de aplicación global y nacional

A escala internacional, la experiencia en maíz en China ha mostrado que los esquemas de recomendación sitio-específica, como Nutrient Expert, pueden sostener el rendimiento y la rentabilidad y, al mismo tiempo, mejorar la eficiencia del uso de nutrientes mediante estrategias 4R adaptadas a cada sitio, según reportaron Xu et al. (2014) tras validar el sistema en cientos de fincas de productores. En Australia, particularmente en la región de Mackay Whitsunday, se ha documentado que la aplicación variable de nutrientes en caña de azúcar puede mejorar la rentabilidad del predio y contribuir a reducir el nitrógeno inorgánico disuelto en el escurrimiento, aspecto de gran relevancia para la protección del ecosistema del Gran Arrecife, como indican Rust (2017) y Webster et al. (2012). En Virginia, los desarrollos de fertilización nitrogenada variable en trigo, apoyados en sensores tipo GreenSeeker, han mostrado reducciones de nitrógeno aplicado sin detrimento claro del rendimiento en algunos escenarios experimentales y de validación técnica.

En Colombia, la adopción de estas herramientas también ha venido avanzando. Cenicaña reportó dentro de sus desarrollos tecnológicos el uso de fertilización a tasa variable y de drones en el sistema cañero, lo que evidencia un proceso de incorporación gradual de prácticas de AP en el Valle del Cauca. De manera similar, Fedearroz ha mostrado ensayos de agricultura por ambientes y experimentos de nutrición fosfórica basados en SIFAWEB, además de promover planes de fertilización sustentados en análisis de suelos y manejo eficiente del riego. Más que presentar cifras homogéneas para todo el país, estos ejemplos muestran que la agricultura colombiana ya está transitando hacia esquemas de manejo nutricional más diferenciados y basados en información.

5. Diseño de mapas de prescripción.

El diseño de mapas de prescripción constituye una herramienta central de la AP, ya que permite definir aplicaciones sitio-específicas de

fertilizantes, correctivos, agua u otros insumos a partir de la variabilidad espacial del suelo y del cultivo. Para construir estos mapas, normalmente se integran capas de información como muestreos georreferenciados de suelo, conductividad eléctrica aparente, topografía, imágenes remotas, historial de rendimiento y objetivos agronómicos del lote. Grisso et al. (2011) señalaron que este proceso es la base operativa de la VRT basada en mapas, mientras que la experiencia en monitoreo de rendimiento y geoposicionamiento consolidó la utilidad de estas capas para transformar la variabilidad del campo en decisiones de manejo más precisas.

Desde el punto de vista histórico, la AP empezó a consolidarse en los años ochenta, cuando el reconocimiento de la variabilidad intralote comenzó a traducirse en prácticas concretas de manejo diferencial. En Minnesota, por ejemplo, se documenta que en 1985 investigadores de la Universidad de Minnesota aplicaron diferentes dosis de cal en campo y evaluaron sus efectos, un antecedente importante en el desarrollo de la lógica de manejo variable. Más adelante, el muestreo en malla, los sensores de rendimiento y la incorporación del GPS permitieron pasar de ensayos puntuales a la elaboración sistemática de mapas de recomendación para fertilización y corrección de pH, tal como resume la historia de la AP en Minnesota y la revisión de Robert (1999) (ver figura 4).

Figura 4. *Diseño de mapa de prescripción variable para fertilización a partir de imágenes Sentinel-2 NDVI*



Fuentes: Modificado de SatAgro (2023).

6. Metodologías para el diseño de mapas de prescripción

Existen diversas metodologías para diseñar mapas de prescripción, y su elección depende del nivel de detalle requerido, de la disponibilidad de información espacial y de los objetivos del manejo agronómico. En términos generales, estas metodologías buscan representar la variabilidad del suelo y del cultivo para traducirla en recomendaciones diferenciadas de fertilización, corrección o manejo dentro del lote.

- El muestreo en cuadrícula (grid sampling) (ver figura 5). Consiste en la toma sistemática de muestras de suelo siguiendo una malla regular, con el propósito de identificar la variabilidad espacial de nutrientes, pH y otros atributos edáficos. Posteriormente, los resultados analíticos se interpolan mediante herramientas

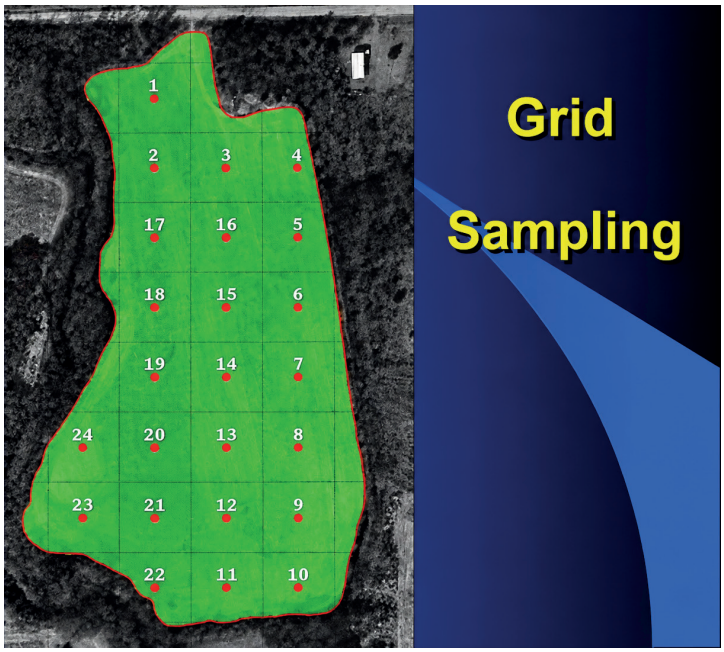
geoestadísticas para construir superficies continuas que sirvan de base para los mapas de prescripción. Como explican Farmaha, Caughman y Park (2020), este enfoque permite delimitar zonas con diferente necesidad de fertilización o encalado, mientras que Matcham et al. (2021) señalan que los mapas interpolados a partir de muestreos en cuadrícula son una base directa para la formulación de prescripciones de fertilización variable.

- Los sensores remotos constituyen otra metodología ampliamente utilizada en el diseño de mapas de prescripción. Mediante imágenes satelitales, drones o plataformas aéreas, es posible obtener información espacial y temporal sobre el vigor del cultivo, el desarrollo foliar y posibles restricciones nutricionales. En este contexto, índices de vegetación como el NDVI, propuesto por Rouse et al. (1974), han sido fundamentales para interpretar la condición de la vegetación a partir de la reflectancia en el rojo y el infrarrojo cercano. Más recientemente, Yang et al. (2022) demostraron que la integración de imágenes satelitales y UAV puede emplearse para construir mapas de recomendación nitrogenada con mayor ajuste espacial en arroz, lo que confirma el valor de la teledetección para la fertilización de precisión.

- Los modelos predictivos representan una tercera metodología de gran relevancia. Estos modelos integran datos históricos de rendimiento, condiciones climáticas, propiedades del suelo, variables espectrales y, en algunos casos, información generada por sensores en tiempo real, con el fin de anticipar la demanda de nutrientes y optimizar las dosis aplicadas en diferentes sectores del lote. Ennaji et al. (2023) señalan que el aprendizaje automático se ha convertido en una herramienta cada vez más importante para la estimación del estado nutricional y la formulación de decisiones de fertilización, especialmente en sistemas donde las relaciones entre variables son complejas y no lineales. En consecuencia, los modelos predictivos fortalecen la generación de mapas de

prescripción más dinámicos, precisos y ajustados a la variabilidad real del sistema productivo.

Figura 5. *Muestreo en Cuadrícula - Grid Sampling*



Fuentes: Modificado de SatAgro (2023).

Actualmente, el diseño de mapas de prescripción se integra en plataformas de software que permiten su elaboración, visualización, ajuste y gestión operativa dentro de esquemas de AP. En este contexto, herramientas como EOSDA Crop Monitoring incorporan funciones para crear mapas VRA a partir de imágenes satelitales, índices de vegetación y analítica del lote, facilitando la aplicación variable de semillas, fertilizantes y productos de protección vegetal según las condiciones específicas de cada zona del campo. Esta integración entre monitoreo remoto, procesamiento digital y ejecución en maquinaria agrícola ha fortalecido la precisión de las recomendaciones y la operatividad del manejo sitio-específico.

En Colombia, el diseño de mapas de prescripción ha comenzado a incorporarse de manera progresiva en cultivos como la caña de azúcar, en articulación con estrategias más amplias de AP y manejo eficiente del nitrógeno. Sin embargo, no encontré una fuente verificable que confirmara exactamente las cifras de "seis campos", "95% de eficiencia", "75% de reducción de excesos de nitrógeno" y "94% de disminución de emisiones" tal como aparecen en el texto original. Por ello, conviene formular esta idea de manera más prudente y técnicamente sólida: los estudios y desarrollos en el sistema cañero colombiano indican que una fertilización mejor ajustada a los requerimientos nutricionales y al comportamiento espacial del cultivo puede mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno y contribuir a reducir pérdidas y emisiones asociadas al manejo convencional.

El diseño de mapas de prescripción ofrece múltiples beneficios, entre ellos la optimización del uso de insumos, el mejor aprovechamiento de la variabilidad espacial, el fortalecimiento de la salud del suelo, el incremento de la eficiencia productiva y la reducción del impacto ambiental. No obstante, su implementación todavía enfrenta retos relacionados con el costo de las tecnologías, la necesidad de capacitación especializada, la calidad de los datos y la interoperabilidad entre plataformas y equipos. A pesar de estas limitaciones, su adopción continúa en aumento debido a la necesidad de avanzar hacia una agricultura más eficiente, rentable y sostenible.

7. Equipos para la aplicación variable.

La AP puede entenderse como un enfoque orientado a producir de manera más eficiente mediante el uso de información espacial y temporal para ajustar las decisiones de manejo. En este proceso, los equipos para aplicación variable han desempeñado un papel decisivo, porque permiten modificar automáticamente la cantidad de insumos, como fertilizantes, correctivos, semillas o agroquímicos, según las características de cada sector del lote. Como explicó Mulla (2013), el desarrollo de sensores remotos, plataformas de monitoreo y tecnologías de manejo sitio-específico ha sido

fundamental para consolidar esta transición hacia sistemas productivos más precisos y adaptativos (ver figura 6).

Figura 6. *Mapa de aplicación de tasa variables*



Fuente: Generado por IA

La historia de la aplicación variable se remonta a mediados de la década de 1980 en Estados Unidos y Europa, cuando los avances en sensores, geoposicionamiento y microprocesadores comenzaron a integrarse al manejo agrícola. En ese contexto, la AP surgió como una respuesta tecnológica a la necesidad de reconocer y manejar la variabilidad espacial dentro del lote. Como explicó Robert (2002), los primeros desarrollos estuvieron orientados a mejorar la aplicación de fertilizantes mediante tasas y mezclas diferenciadas según las condiciones del terreno, mientras que Gebbers y Adamchuk (2010) señalaron que la consolidación posterior de este enfoque dependió de la capacidad de convertir datos georreferenciados en decisiones agronómicas específicas. El desarrollo inicial estuvo estrechamente vinculado al avance de los sistemas de información geográfica y al acceso a la navegación satelital, lo que hizo posible georreferenciar datos agronómicos y construir los primeros mapas de manejo sitio-específico.

8. Diseño de mapas de prescripción para equipos VRT

El diseño de mapas de prescripción para aplicación variable se fundamenta en el procesamiento y análisis de datos espaciales. Tradicionalmente, el primer paso consiste en la caracterización detallada del terreno mediante muestreos georreferenciados de suelo, imágenes satelitales, drones y sensores de proximidad. Adamchuk et al. (2004) destacaron que estos sensores permiten capturar propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo en movimiento, lo que amplía la resolución espacial del diagnóstico. Posteriormente, la información se integra y procesa en plataformas SIG, donde se generan mapas de variabilidad de atributos como pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, textura o niveles de nutrientes. A partir de esas capas temáticas se construyen los mapas de prescripción que determinan cuánto aplicar y en qué lugar hacerlo, dentro de una lógica de manejo sitio-específico.

En cuanto a las formas de aplicación variable, pueden distinguirse tres grandes enfoques: la prescripción basada en mapas, la aplicación en tiempo real mediante sensores y las estrategias combinadas (ver figura 7). La modalidad más tradicional y aun ampliamente utilizada es la basada en mapas, en la cual fertilizadoras, sembradoras o pulverizadoras son controladas por un computador de a bordo que ajusta la dosis conforme avanza el equipo en el lote. Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004) subrayaron que este enfoque ha sido central en la relación entre AP y sostenibilidad, precisamente porque mejora la eficiencia en el uso de insumos y reduce pérdidas. Por otra parte, la aplicación en tiempo real representa una evolución importante, ya que utiliza sensores ópticos o de dosel para medir instantáneamente propiedades del cultivo o del suelo y ajustar la dosis de forma automática. Scharf et al. (2002) mostraron tempranamente el potencial de la teledetección para apoyar el manejo nitrogenado, y revisiones recientes confirman que el monitoreo en tiempo real y los sensores activos de cultivo se han convertido en una de las vías más prometedoras para la gestión precisa del nitrógeno.

Figura 7. *Tractores autónomos integrado a sistemas de aplicación de tasa variable*



Fuente: adaptado de CNH Industrial N.V. (2016).

9. Equipos clave y tendencias

Entre los equipos más utilizados actualmente para la aplicación variable se encuentran las fertilizadoras de tasa variable, las pulverizadoras con control por secciones y las sembradoras de precisión, todas ellas integradas con sistemas de guiado, control electrónico y gestión digital de datos. En este campo, fabricantes como John Deere, PTx Trimble y Ag Leader ofrecen soluciones que combinan geoposicionamiento, controladores de aplicación y plataformas de monitoreo para ejecutar manejo sitio-específico en distintos tipos de maquinaria.

En el caso de John Deere, el Rate Controller 2000 aparece como un controlador compatible con aplicaciones de NH3 y productos secos, además de estar integrado en el entorno de configuración de implementos y operaciones del sistema de la marca. Por su parte, el sistema Field-IQ de Trimble, actualmente articulado dentro del ecosistema PTx Trimble, permite controlar tasas de aplicación, secciones y distintos materiales,

incluidos semilla, fertilizante granular, fertilizante líquido y amoníaco anhidro, con soporte para mapas de prescripción y registro automatizado de las operaciones (ver figura 8).

Figura 8. *Pulverizadoras de tasa variable y sembradoras de precisión*



Fuente: Adaptado de John Deere (2025).

Por ello, más que centrarse únicamente en modelos específicos, conviene resaltar que estos equipos permiten modular insumos por secciones o mediante esquemas de aplicación continua, según la arquitectura del controlador, la compatibilidad con la pantalla en cabina y el tipo de implemento utilizado. En consecuencia, la aplicación variable se consolida como uno de los componentes más importantes de la AP contemporánea, al traducir la información espacial en decisiones operativas dentro del lote.

En el mundo, el uso de estas tecnologías ha transformado sistemas de producción tan diversos como el maíz y la soya en Estados Unidos, los cereales en Australia y la viticultura en Francia. En Norteamérica, la aplicación variable de nutrientes ha mostrado beneficios en eficiencia del manejo nitrogenado y en la delimitación de zonas de respuesta diferencial dentro del lote. En Australia, la fertilización variable en sistemas cerealistas

se ha asociado con mejoras económicas y con una mejor adaptación del manejo a la heterogeneidad del suelo y del rendimiento. En Francia y en otros contextos vitivinícolas, la variabilidad intra-parcelaria se utiliza para ajustar fertilización, riego y cosecha selectiva, con el propósito de mejorar la calidad de la uva y del vino, como lo documentó Bramley (2005).

En Colombia, aunque la adopción ha sido más reciente, ya se observan avances en cultivos como caña de azúcar, arroz y palma de aceite, especialmente en procesos de agricultura por ambientes, monitoreo remoto y fertilización más ajustada a la variabilidad del terreno. No obstante, para este fragmento prefiero no conservar los porcentajes exactos originalmente incluidos sobre incrementos de productividad o reducción de costos, porque no quedaron confirmados de forma inequívoca con las referencias tal como estaban citadas. Desde la perspectiva del diseño de mapas de prescripción, en el país se han venido combinando muestreos dirigidos de suelo, imágenes de vegetación obtenidas con drones y modelaciones del rendimiento potencial con base en información histórica. A futuro, la integración de inteligencia artificial, aprendizaje automático y big data permitirá construir mapas dinámicos capaces de actualizarse en tiempo casi real, fortaleciendo aún más la capacidad de decisión en campo.

En este sentido, los equipos de aplicación variable no representan únicamente una innovación tecnológica, sino también un cambio de paradigma. El campo deja de asumirse como una superficie homogénea y pasa a entenderse como un sistema espacialmente diverso, donde cada zona puede requerir decisiones distintas. Mirando hacia adelante, es razonable esperar tecnologías cada vez más integradas, autónomas y sostenibles, en las que la semilla, el fertilizante o el agua se apliquen exactamente en el lugar y en el momento de mayor necesidad.

10. Seguimiento y ajustes post aplicación.

El seguimiento y los ajustes post-aplicación en fertilización y manejo variable de nutrientes constituyen una fase esencial dentro de la AP, ya que

permiten evaluar la respuesta real del cultivo después de la intervención inicial y, a partir de ello, realizar correcciones sustentadas en nueva información espacial y temporal. Este enfoque favorece la optimización de la disponibilidad de nutrientes, la reducción de pérdidas por lixiviación o volatilización, el uso más eficiente de los insumos y una mayor sostenibilidad del sistema productivo, tal como señalaron Pierce y Nowak (1999).

Desde una perspectiva histórica, este proceso se fortaleció a partir de los años 2000, cuando el desarrollo de mapas de rendimiento, sensores remotos y plataformas de análisis espacial permitió cerrar el ciclo de manejo agronómico de precisión. Mulla (2013) destacó precisamente que el monitoreo posterior a la aplicación es fundamental para evaluar la efectividad de las decisiones tomadas y para retroalimentar los siguientes ciclos de manejo. Diseñar mapas para seguimiento y ajuste post-aplicación implica, en primer lugar, capturar información espacial mediante sensores de campo, satélites, drones o sistemas montados sobre maquinaria; en segundo lugar, construir mapas que reflejen la respuesta del cultivo a la fertilización inicial; en tercer lugar, analizar dicha variabilidad con herramientas geoestadísticas, como el kriging o la interpolación por regresión, como explicaron Oliver y Webster (2014); y, finalmente, generar nuevos mapas de prescripción que orienten una segunda intervención o un ajuste localizado.

Entre las herramientas más utilizadas para este seguimiento se encuentran los sensores ópticos activos, como GreenSeeker y Crop Circle, que permiten estimar en tiempo real índices de vegetación como el NDVI y relacionarlos con necesidades nutricionales específicas. Raun et al. (2005) mostraron que este tipo de sensores puede integrarse en algoritmos de recomendación nitrogenada, mejorando la oportunidad y precisión de las decisiones en campo.

11. Tipos de mapas utilizados

Entre los mapas más empleados actualmente en AP se encuentran los mapas de vigor vegetativo, construidos a partir de índices como NDVI

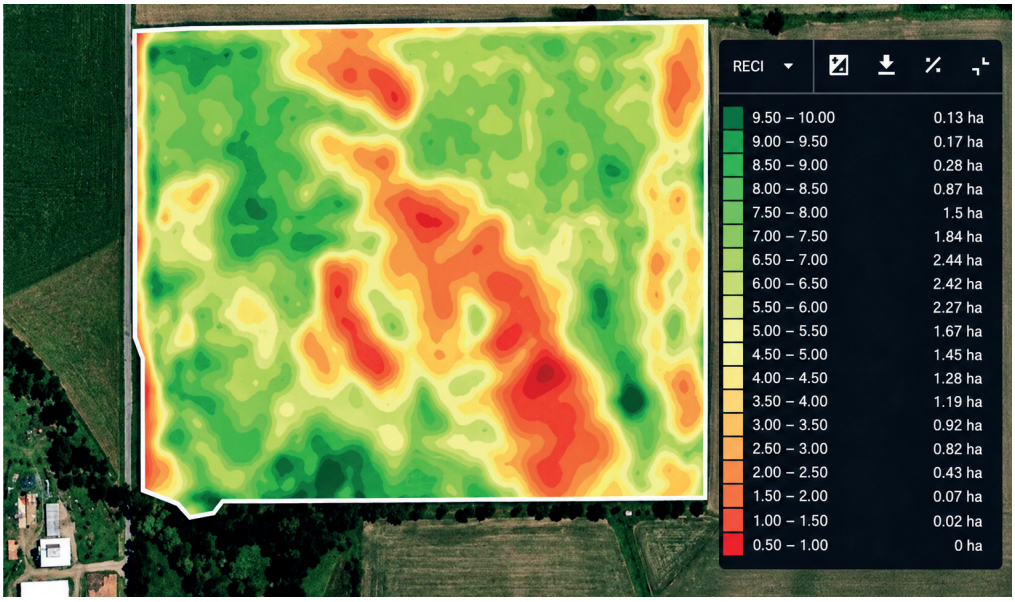
y NDRE, los mapas de biomasa, los mapas de contenido de clorofila y los mapas de variabilidad del suelo, como los de conductividad eléctrica aparente (ver figura 9). Este tipo de cartografía permite identificar áreas con diferente respuesta agronómica y ajustar de manera localizada las decisiones de fertilización y manejo (ver figura 10). Por ejemplo, los mapas de vigor pueden revelar sectores con deficiencia de nitrógeno después de una aplicación, mientras que los mapas de biomasa permiten evaluar la respuesta del cultivo frente a la nutrición o a otras prácticas de manejo. Asimismo, los mapas de conductividad eléctrica aparente han sido ampliamente utilizados para representar patrones espaciales del suelo y delimitar zonas de manejo, como reportaron Simbahan et al. (2004).

Figura 9. *Mapa de vigor de la vegetación (NDVI) como insumo para la estimación de biomasa y el pago por servicios ambientales por secuestro de carbono*



Fuente: Modificado de OneSoil. (2025)

Figura 10. *Mapa satelital del índice RECI para la estimación espacial del contenido de clorofila en pasturas.*



Fuente: Modificado de OneSoil. (2025)

En el contexto internacional, el seguimiento y el ajuste post-aplicación se han consolidado como componentes esenciales del manejo de nutrientes en AP. En Estados Unidos, los avances en sensores de dosel y en algoritmos de recomendación nitrogenada han demostrado que el monitoreo posterior a la fertilización mejora la oportunidad de las decisiones y fortalece la eficiencia del uso del nitrógeno, tal como lo documentaron Raun et al. (2005) y Mulla (2013). En sistemas vitícolas, Bramley (2005) mostró que el manejo intra-parcelaria basado en variabilidad espacial permite ajustar prácticas como fertilización, riego y cosecha de acuerdo con la respuesta diferenciada del cultivo.

En América Latina, instituciones de investigación como Embrapa y Cenicaña han fortalecido el uso de percepción remota y monitoreo espacial para evaluar la respuesta de los cultivos frente al manejo agronómico. En

Brasil, la investigación en sensoriamiento remoto agrícola ha ampliado el uso de imágenes y análisis espaciales en sistemas productivos extensivos, mientras que en Colombia Cenicaña desarrolló una línea de trabajo específica sobre monitoreo de caña de azúcar mediante percepción remota, incluyendo el análisis de la respuesta espectral del cultivo ante distintas prácticas de manejo y dosis de fertilización nitrogenada. Más que sostener porcentajes únicos para todos los contextos, estos antecedentes muestran una tendencia clara hacia el seguimiento post-aplicación como parte del manejo nutricional de precisión.

Las tecnologías de monitoreo más empleadas en esta etapa incluyen sensores ópticos activos, sensores remotos satelitales, drones y plataformas digitales capaces de integrar datos de humedad del suelo, clima y estado nutricional del cultivo. Mulla (2013) destacó que, en los últimos veinticinco años, la resolución espacial, temporal y espectral de la teledetección mejoró notablemente, lo que incrementó su valor para el seguimiento agronómico. De manera complementaria, Raun et al. (2005) demostraron que los sensores ópticos activos pueden incorporarse a algoritmos de fertilización nitrogenada para ajustar las dosis según la respuesta real del cultivo.

Desde el punto de vista metodológico, el diseño de mapas de ajuste post-aplicación exige considerar el tipo de cultivo, su estado fenológico, las propiedades físico-químicas del suelo y las condiciones climáticas locales. Este proceso requiere, en primer lugar, la captura de información espacial; posteriormente, la construcción de mapas de respuesta del cultivo; luego, el análisis de la variabilidad mediante técnicas geoestadísticas; y, finalmente, la generación de nuevas prescripciones ajustadas. Oliver y Webster (2014) explicaron que herramientas como el variograma y el kriging son fundamentales para interpolar datos espaciales y construir mapas confiables, mientras que Simbahan et al. (2004) evidenciaron que el uso de información secundaria multivariable mejora la resolución y precisión de los mapas de suelos.

En consecuencia, el seguimiento y ajuste post-aplicación representan una fase crítica en la evolución de la AP hacia modelos más inteligentes, sostenibles y resilientes. Su implementación efectiva depende de la articulación entre tecnologías avanzadas, conocimiento agronómico y sistemas robustos de gestión de datos. La experiencia internacional y los avances institucionales observados en Colombia indican que esta estrategia no solo optimiza el uso de nutrientes, sino que también fortalece la capacidad adaptativa de los sistemas agrícolas frente a escenarios de mayor variabilidad ambiental.

La fertilización y el manejo variable de nutrientes constituyen, por tanto, uno de los pilares más importantes en la transición hacia una AP eficiente y sostenible. La integración de sistemas de posicionamiento, sensores remotos y proximales, plataformas SIG y mapas de prescripción ha permitido superar la lógica de aplicación uniforme, dando paso a un manejo sitio-específico que responde a la heterogeneidad espacial y temporal del agroecosistema. Como señalaron Gebbers y Adamchuk (2010), el verdadero valor de estas tecnologías radica en convertir datos en decisiones agronómicas concretas, mientras que Robert (2002) explicó que este cambio representa un desafío central para la nutrición de cultivos.

La evolución conceptual que va desde la ley del mínimo de Liebig hasta la fertilización a tasa variable evidencia una transformación profunda en la gestión agronómica. Los mapas de prescripción, construidos a partir de muestreos georreferenciados, imágenes remotas, índices de vegetación y datos históricos de rendimiento, orientan una dosificación más precisa de los insumos. A su vez, los equipos de aplicación variable, ya sea controlados por mapas o por sensores en tiempo real, permiten ejecutar estas decisiones en el terreno con mayor exactitud, reduciendo pérdidas por lixiviación o escorrentía y mejorando simultáneamente la rentabilidad y el desempeño ambiental del sistema productivo.

El seguimiento posterior a la aplicación cierra el ciclo del manejo de nutrientes, porque permite monitorear el vigor del cultivo, la biomasa, la

clorofila y otros indicadores de respuesta mediante satélites, drones, sensores de campo y plataformas conectadas. Esta retroalimentación continua hace posible ajustar las estrategias en función de la fenología del cultivo y de las condiciones agroecológicas cambiantes, incrementando la eficiencia de uso de nutrientes y fortaleciendo la sostenibilidad del sistema. En este escenario, la incorporación futura de inteligencia artificial, aprendizaje automático y analítica espacial en tiempo real hará posible mapas dinámicos y predictivos cada vez más sofisticados, consolidando la AP como una ruta estratégica para la producción alimentaria resiliente del siglo XXI.

Síntesis final

El capítulo 7 permitió comprender que la fertilización y el manejo variable de nutrientes constituyen uno de los componentes más importantes de la agricultura de precisión, debido a que transforman la aplicación uniforme de fertilizantes en una estrategia sitio-específica basada en la variabilidad real del suelo, del cultivo y del ambiente. A lo largo del capítulo se evidenció que esta transición no depende únicamente de contar con fertilizantes, maquinaria o equipos modernos, sino de integrar datos georreferenciados, análisis de suelo, sensores, imágenes remotas, mapas de rendimiento y criterio agronómico para definir con mayor precisión cuánto nutriente aplicar, dónde aplicarlo y en qué momento hacerlo.

Asimismo, se destacó que la fertilización a tasa variable representa una evolución técnica del manejo nutricional, ya que permite ajustar las dosis de nitrógeno, fósforo, potasio, micronutrientes y enmiendas de acuerdo con las necesidades diferenciadas de cada zona del lote. Esta forma de manejo contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, reducir pérdidas por lixiviación, volatilización o escorrentía, disminuir costos por aplicaciones innecesarias y minimizar impactos ambientales asociados al uso excesivo de fertilizantes. En este sentido, la variabilidad espacial deja de ser una limitante y se convierte en una fuente de información estratégica para mejorar la productividad y la sostenibilidad del sistema.

Otro aspecto central del capítulo fue el papel de los mapas de prescripción como instrumentos operativos para convertir el diagnóstico en acción. Estos mapas integran información proveniente de muestreos georreferenciados, sensores proximales, índices de vegetación, imágenes satelitales, drones, datos históricos de rendimiento y modelos predictivos, y la traducen en instrucciones concretas para la aplicación diferenciada de fertilizantes. Por ello, su elaboración no debe asumirse como un simple ejercicio cartográfico, sino como un proceso técnico de interpretación del territorio productivo, orientado a tomar decisiones más precisas, rentables y ambientalmente responsables.

También se reconoció la importancia de la maquinaria agrícola, los controladores electrónicos, los sistemas GPS/GNSS/RTK, las fertilizadoras de tasa variable y las plataformas digitales como elementos necesarios para ejecutar en campo las recomendaciones generadas a partir del análisis de datos. Sin embargo, el capítulo dejó claro que la tecnología por sí sola no garantiza buenos resultados. La efectividad de la fertilización variable depende de la calidad de los datos, la calibración de los equipos, la interpretación agronómica, la capacitación del personal y la capacidad del productor para integrar la información en un proceso continuo de monitoreo, ajuste y evaluación.

Finalmente, el capítulo resaltó que la fertilización variable tiene un alto potencial para contribuir a una agricultura más eficiente, sostenible y resiliente, especialmente en contextos donde los recursos naturales son limitados y los costos de producción aumentan progresivamente. No obstante, su adopción enfrenta desafíos relacionados con inversión inicial, conectividad, disponibilidad tecnológica, formación técnica y adaptación a pequeños y medianos productores. Por ello, el manejo variable de nutrientes debe entenderse no solo como una innovación tecnológica, sino como una estrategia integral de gestión agronómica que articula productividad, rentabilidad, conservación del suelo, reducción de impactos ambientales y toma de decisiones basada en evidencia.

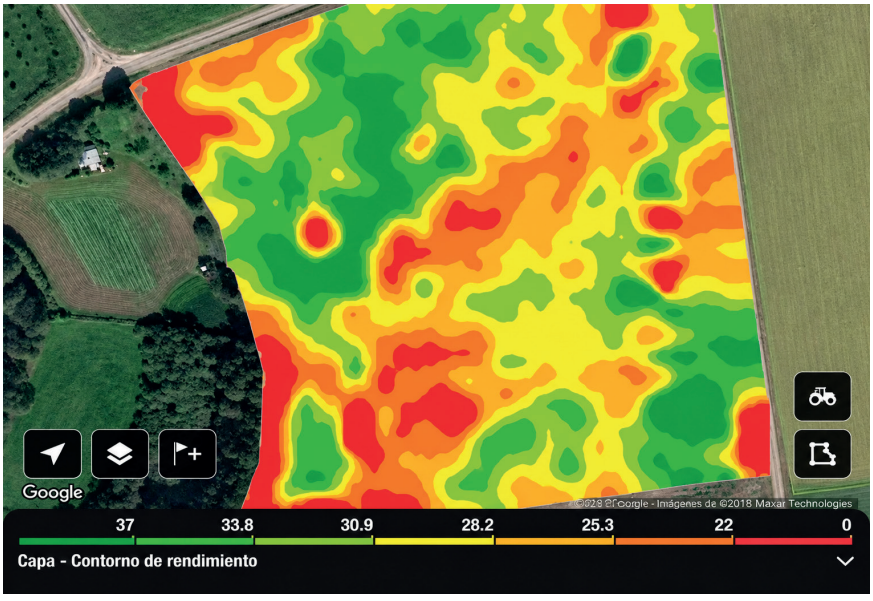
Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1: Análisis de variabilidad espacial y diseño de mapas de prescripción

Objetivo: Comprender cómo la variabilidad del suelo y del cultivo influye en el diseño de mapas de prescripción para la fertilización variable.

Situación: Imaginen que son agrónomos consultores y han sido contratados para optimizar la fertilización nitrogenada en un lote de 20 hectáreas sembrado con maíz. Han realizado un muestreo de suelo por cuadrícula de 1 hectárea (20 puntos) y han obtenido datos de rendimiento de la campaña anterior, así como imágenes satelitales (NDVI) del cultivo en crecimiento en la etapa V6 (ver figura 11).

Figura 11. *Mapa de variabilidad espacial NDVI de cultivo de maíz.*



Fuente: Modificado de OneSoil. (2025)

Preguntas para discusión y trabajo práctico:

1. Interpretación de Datos: Si los análisis de suelo muestran una variabilidad significativa en el contenido de materia orgánica (MO) y nitrógeno total (N), y los mapas de rendimiento histórico revelan zonas de bajo y alto rendimiento, ¿cómo utilizarían esta información para definir zonas de manejo agronómico? Describan al menos tres criterios (ej., MO, rendimiento, vigor) que considerarían para delinear estas zonas.

2. Generación de Mapas de Prescripción: Utilizando software hipotético (o un diagrama esquemático), diseñen un mapa de prescripción simplificado para la aplicación de nitrógeno en este lote (utilice de base la figura 11). Asignen dosis variables (baja, media, alta) a las diferentes zonas de manejo identificadas. Justifiquen sus decisiones de dosificación basándose en los datos iniciales y los principios de la Ley del Mínimo.

3. Tecnologías de Adquisición de Datos: ¿Qué ventajas y desventajas tendría el uso de sensores ópticos montados en drones (para NDVI de alta resolución) en comparación con el muestreo de suelo tradicional por cuadrícula para este caso? ¿Cómo podrían complementar ambas metodologías para obtener una prescripción más precisa?

Ejercicio 2: Selección y calibración de equipos para aplicación variable

Objetivo: Analizar los aspectos técnicos y económicos involucrados en la selección y calibración de equipos para la fertilización a tasa variable.

Situación: Un agricultor de gran escala en el departamento del Meta, Colombia, desea invertir en tecnología VRT para la fertilización de sus cultivos de arroz, buscando optimizar el uso de fósforo en suelos con baja fertilidad (como se mencionó en el capítulo). Ha evaluado dos opciones de equipos:

- Opción A: Una fertilizadora de arrastre con capacidad VRT, controlada por un monitor de a bordo que carga mapas de prescripción previamente diseñados. Costo inicial: $X.

- Opción B: Una fertilizadora equipada con sensores de proximidad que miden la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo en tiempo real y ajustan la dosis de fósforo automáticamente. Costo inicial: $Y (considerablemente más alto que la Opción A).

Preguntas para discusión y trabajo práctico:

1. Criterios de Selección: Además del costo inicial, ¿qué otros criterios técnicos y operativos (ej., precisión, facilidad de uso, escalabilidad, soporte técnico local) considerarían al asesorar al agricultor para elegir entre la Opción A y la Opción B?

2. Proceso de Calibración: Expliquen los pasos esenciales para la calibración de una fertilizadora de tasa variable antes de su uso en campo. ¿Por qué es crítica una calibración adecuada para asegurar la eficiencia de la aplicación y evitar sobredosis/subdosis de nutrientes?

3. Compatibilidad y Flujo de Datos: ¿Qué tecnologías adicionales serían necesarias para asegurar un flujo de datos eficiente desde la generación del mapa de prescripción (o la lectura del sensor) hasta la aplicación en campo con cualquiera de las dos opciones? Mencionen la importancia del formato de archivos y la conectividad entre dispositivos.

Ejercicio 3: Evaluación y ajuste post-aplicación de nutrientes

Objetivo: Desarrollar habilidades para monitorear la respuesta del cultivo a la fertilización variable y proponer ajustes.

Situación: Tras una aplicación de nitrógeno a tasa variable en un cultivo de trigo, un agrónomo desea evaluar la eficacia de la estrategia.

Ha utilizado imágenes satelitales semanales (Sentinel-2) para generar mapas de NDVI y contenido de clorofila post-aplicación.

Preguntas para discusión y trabajo práctico:

1. **Interpretación de Mapas Post-Aplicación:** Observan en los mapas de NDVI que ciertas zonas del campo que recibieron dosis medias de nitrógeno (según la prescripción inicial) ahora muestran un vigor vegetativo menor al esperado, similar a zonas con baja dosificación. ¿Cuáles podrían ser las posibles causas de esta discrepancia (ej., compactación del suelo, estrés hídrico, otra deficiencia nutricional no considerada, ineficiencia de la aplicación)?

2. **Propuesta de Ajustes:** Con base en la interpretación de los mapas post-aplicación, ¿qué acciones correctivas o "fertilizaciones de rescate" propondrían para las zonas con bajo vigor? Describan cómo el uso de sensores proximales (ej., Yara N-Sensor) podría complementar la información de las imágenes satelitales para una decisión más precisa.

3. **Integración de Datos Históricos:** ¿Cómo podría el análisis de datos históricos de rendimiento y el modelado predictivo (como se mencionó en el capítulo con algoritmos de Machine Learning) ayudar a refinar las futuras estrategias de fertilización y ajuste post-aplicación en este mismo lote, minimizando las sorpresas?

Ejercicio 4: Retorno de la Inversión (ROI) y sostenibilidad de la AP

Objetivo: Cuantificar los beneficios económicos y ambientales de la AP en el manejo de nutrientes.

Situación: Una empresa agrícola en el Valle del Cauca está considerando adoptar la fertilización variable para sus cultivos de caña de azúcar. Estiman una inversión inicial de $Z para equipos, software y capacitación. Proyectan una reducción del 15% en el uso de

fertilizantes nitrogenados y un aumento del 5% en la productividad, basándose en los ejemplos de éxito mencionados en el capítulo.

Preguntas para discusión y trabajo práctico:

1. Cálculo Simplificado del ROI: Asumiendo un costo anual de fertilizantes de $A y un ingreso anual por la venta de caña de azúcar de $B (antes de la AP), realicen un cálculo simplificado del retorno de la inversión (ROI) para la adopción de la fertilización variable. ¿Cuántos años tomaría recuperar la inversión inicial, considerando solo el ahorro de fertilizantes y el incremento de ingresos? (Pueden usar valores hipotéticos para A, B y Z).

2. Beneficios No Cuantificables Directamente: Más allá de los beneficios económicos directos, discutan los beneficios ambientales y sociales que la adopción de la fertilización variable podría generar para la empresa y la región (ej., reducción de la huella de carbono, mejora de la calidad del agua, optimización de recursos escasos, reputación de la empresa). ¿Cómo se podrían «valorar» estos beneficios?

3. Barreras a la Adopción: A pesar de los claros beneficios, ¿qué barreras o desafíos podrían enfrentar los agricultores (especialmente pequeños y medianos) en Colombia para la adopción generalizada de la AP y la fertilización variable? Propongan estrategias para superar estas barreras.

Ejercicio 5: La AP como herramienta para la seguridad alimentaria global.

Objetivo: Reflexionar sobre el papel de la AP en el contexto de la creciente demanda de alimentos y la sostenibilidad global.

Situación: La población mundial sigue creciendo, y la demanda de alimentos se incrementa, mientras que los recursos naturales (suelo,

agua) son limitados y el cambio climático impone nuevos desafíos a la producción agrícola.

Preguntas para Discusión:

1. Desafío del "Producir Más con Menos": Discutan cómo la fertilización y el manejo de nutrientes de forma variable abordan directamente el imperativo de "producir más con menos" en el contexto de la seguridad alimentaria global. ¿Cómo contribuye a una intensificación sostenible de la agricultura?

2. Mitigación del Cambio Climático: ¿De qué manera la optimización del uso de fertilizantes nitrogenados (especialmente) a través de la AP puede contribuir a la mitigación del cambio climático, considerando las emisiones de óxido nitroso (N2O) asociadas con su aplicación?

3. Rol de la Investigación y el Desarrollo: ¿Qué áreas de investigación y desarrollo futuras en AP (ej., integración de la inteligencia artificial, nuevas generaciones de sensores, robótica agrícola) consideran más prometedoras para enfrentar los retos de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola a largo plazo?

Síntesis final

El capítulo 7 permitió comprender que la fertilización y el manejo variable de nutrientes constituyen uno de los núcleos más importantes de la AP, porque transforman la lógica tradicional de aplicación uniforme en un enfoque sitio-específico, sustentado en la variabilidad real del suelo, del cultivo y del ambiente. A lo largo del capítulo se evidenció que esta transición no depende únicamente de la disponibilidad de fertilizantes o de maquinaria moderna, sino de la capacidad de integrar información geoespacial, análisis agronómico y tecnologías de aplicación para decidir cuánto nutriente aplicar, dónde hacerlo y en qué momento resulta más conveniente.

También quedó claro que la fertilización a tasa variable representa una evolución técnica y conceptual en el manejo nutricional. Su valor radica en que permite ajustar las dosis de nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes de acuerdo con las necesidades diferenciadas del lote, mejorando la eficiencia en el uso de insumos y reduciendo pérdidas por lixiviación, volatilización o escorrentía. En este sentido, los métodos basados en mapas, sensores e imágenes satelitales mostraron que la variabilidad espacial puede convertirse en una ventaja cuando se interpreta correctamente y se traduce en decisiones agronómicas precisas.

Otro aspecto central del capítulo fue el papel de los mapas de prescripción como herramienta operativa para materializar el manejo variable. Estos mapas sintetizan la información obtenida a partir de muestreos georreferenciados, índices de vegetación, sensores proximales, datos históricos de rendimiento y modelos predictivos, y la convierten en instrucciones concretas para la maquinaria agrícola. Así, el diseño de mapas de prescripción no solo constituye un ejercicio cartográfico, sino un proceso técnico de interpretación del territorio productivo, orientado a optimizar la fertilización, mejorar la salud del suelo y aumentar la rentabilidad del sistema.

De igual manera, el capítulo mostró que los equipos para aplicación variable son el puente entre el análisis de datos y la ejecución en campo. Fertilizadoras, pulverizadoras y sembradoras con control electrónico, sistemas de posicionamiento y computadores de a bordo permiten aplicar insumos de forma diferenciada, por secciones o en tiempo real. Esta capacidad convierte a la maquinaria en un componente activo de la toma de decisiones, ya que no solo ejecuta una labor, sino que responde a la variabilidad espacial del lote y a las recomendaciones derivadas del análisis previo.

El seguimiento y los ajustes post-aplicación se consolidaron igualmente como una fase indispensable dentro del ciclo de manejo nutricional. No basta con diseñar una prescripción adecuada y ejecutarla correctamente;

es necesario evaluar la respuesta del cultivo, monitorear cambios en vigor, biomasa o estado nutricional, y realizar correcciones cuando las condiciones del sistema así lo exijan. Esta retroalimentación fortalece la eficiencia del manejo y convierte la fertilización variable en un proceso dinámico, adaptativo y continuo, más cercano a la lógica de un sistema inteligente que a una simple aplicación mecánica de insumos.

En conjunto, el capítulo reafirma que la fertilización variable no es solo una innovación técnica, sino un cambio de paradigma en la manera de entender la nutrición vegetal y la gestión del suelo. Su aporte principal consiste en reconocer que dentro de un mismo lote existen diferencias significativas que deben ser consideradas para producir mejor, con menos desperdicio y con menor impacto ambiental. Por ello, la gestión variable de nutrientes se proyecta como una estrategia clave para fortalecer la sostenibilidad, la rentabilidad y la resiliencia de la producción agrícola contemporánea.

Finalmente, el capítulo deja como conclusión que el futuro del manejo nutricional estará cada vez más ligado a la integración entre sensórica, teledetección, inteligencia artificial, modelación predictiva y sistemas de soporte a decisiones. Esta convergencia tecnológica permitirá construir recomendaciones más finas, mapas más dinámicos y ajustes más oportunos, consolidando una agricultura capaz de responder con precisión a los desafíos productivos y ambientales del siglo XXI.

Referencias

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 44(1), 71–91. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002

Ag Leader Technology. (2025). Applicator. Ag Leader. https://www.agleader.com/applicator/

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. Precision Agriculture, 5, 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

Bramley, R. G. V. (2005). Understanding variability in winegrape production systems 2: Within-vineyard variation in quality over several vintages. Australian Journal of Grape and Wine Research, 11(1), 33–42. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00277.x

Cardoso, V. de F. (Ed.). (2023). Sensoriamento remoto para avaliar o histórico de culturas, cobertura do solo com palha e tempo sem revolvimento do solo em áreas agrícolas, para uso no ZARC níveis de manejo (Documentos 454). Embrapa Soja.

Cenicaña. (2020). Annual report 2020. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

CNH Industrial N.V. (2016, 30 de agosto). CNH Industrial brands reveal concept autonomous tractor development: Driverless technology to boost precision and productivity. CNH Industrial. https://media.cnh.com/emea/cnh/cnh-industrial-brands-reveal-concept-autonomous-tractor-development--driverless-technology-to-boost-/s/a2259742-061a-412a-8a12-d307dbaedd88

Deere & Company. (2023, 1 de noviembre). Tillage price pages: 2510H dry nutrient attachments and Rate Controller 2000 compatibility. John Deere.

DJI. (2018). Zenmuse XT 2 user manual. https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse%20XT%202/Zenmuse_XT_2_User_Manual_v1.0_en_.pdf

DJI. (2019). Zenmuse XT S user manual. https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_XT_S/Zenmuse_XT_S_User_Manual_EN.pdf

Ennaji, O., Barzegar, A., El Jarroudi, M., & Zeroual, A. (2023). Machine learning in nutrient management: A review. Smart Agricultural Technology, 5, 100294. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100294

EOS Data Analytics. (2025). VRA maps for precision variable rate applications. EOSDA Crop Monitoring. https://eos.com/products/crop-monitoring/vra-maps/

Farmaha, B. S., Caughman, W., & Park, D. (2020). Precision agriculture-based soil sampling strategies. Land-Grant Press. https://lgpress.clemson.edu/publication/precision-agriculture-based-soil-sampling-strategies/

Fedearroz. (2023, 10 de agosto). Diagnóstico de suelos y nutrición del cultivo de arroz. Federación Nacional de Arroceros. https://fedearroz.com.co/es/servicios-al-arrocero/eventos-tecnicos-fedearroz-fna/diagn%C3%B3stico-de-suelos-y-nutrici%C3%B3n-del-cultivo-de-arroz/

Fedearroz. (2025, 16 de junio). Detalles importantes de la agricultura de precisión. Federación Nacional de Arroceros.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Grisso, R. D., Alley, M. M., Thomason, W. E., Holshouser, D. L., & Roberson, G. T. (2011). Precision farming tools: Variable-rate application. Virginia Cooperative Extension, Virginia Tech. http://hdl.handle.net/10919/47448

John Deere. (2025). Planters & planting equipment. John Deere. https://www.deere.com/en/planting-equipment/

Johnson, C. K., Mortensen, D. A., Wienhold, B. J., Shanahan, J. F., & Doran, J. W. (2003). Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. Agronomy Journal, 95(2), 303–315. https://doi.org/10.2134/agronj2003.0303

Kumar, V., Jat, D., Kumar, A., Kumar, A., Kamilaris, A., Alhaj Hamoud, Y., & Kumar, R. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT and AI. Smart Agricultural Technology, 9, 100523. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100523

Matcham, E. G., Lark, R. M., Kitchen, N. R., Bullock, D. G., Miller, N. J., Franzen, D. W., Laboski, C. A. M., Mallarino, A. P., & Gelder, B. K. (2021). Implications of choosing different interpolation methods: A case study for soil test phosphorus. Crop, Forage & Turfgrass Management, 7(1), e20126. https://doi.org/10.1002/cft2.20126

Meena, M. S., & Saini, L. S. (2024). Smart pest management: The role of precision agriculture in modern farming. En AgriTech revolution: Advancing sustainable farming volume I (pp. 81–102). Bhumi Publishing. https://www.researchgate.net/publication/385565841_SMART_PEST_MANAGEMENT_THE_ROLE_OF_PRECISION_AGRICULTURE_IN_MODERN_FARMING

Misra, P., & Enge, P. (2006). Global positioning system: Signals, measurements, and performance (2nd ed.). Ganga-Jamuna Press.

MNopedia. (2017, 17 de mayo). Precision agriculture. Minnesota Historical Society.

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Murillo, P. J., & Carbonell, J. A. (2012). Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. Catena, 113, 56–69. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006

OneSoil. (2025). Free farming app for precision agriculture. https://onesoil.ai/

Optris GmbH. (2025). Optris PI 640i: Technical data [Data sheet]. https://optris.com/wp-content/uploads/2025/07/PI-640i-DS-EN2025-07-A_web.pdf

Padilla, F. M., Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2018). Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. Sensors, 18(7), 2083. https://doi.org/10.3390/s18072083

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. Advances in Agronomy, 67, 1–85. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1

PTx Trimble. (2025). GFX displays. PTx Trimble. https://ptxtrimble.com/es/products/hardware/displays/gfx-1060-display

Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). The role of remote sensing data and methods in a modern approach to fertilization in precision agriculture. Remote Sensing, 14(3), 778. https://doi.org/10.3390/rs14030778

Raun, W. R., Solie, J. B., Stone, M. L., Martin, K. L., Freeman, K. W., Mullen, R. W., Zhang, H., Schepers, J. S., & Johnson, G. V. (2005). Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36(19–20), 2759–2781. https://doi.org/10.1080/00103620500303988

Rincón, C. A., Echeverri, J. H., et al. (2016). Influence of management systems on the nitrogen supplying capacity of soil to sugarcane crops. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas.

Robert, P. C. (1999). Precision agriculture: Research needs and status in the USA. En J. V. Stafford (Ed.), Precision agriculture '99: Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture (Part 1, pp. 19–33). Sheffield Academic Press.

Robert, P. C. (2002). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. Plant and Soil, 247, 143–149. https://doi.org/10.1023/A:1021171514148

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (Vol. 1, pp. 309–317). NASA SP-351.

Rust, S., Law, A., & Star, M. (2017). Variable rate nutrient application on sugarcane farms in the Mackay Whitsunday region. Australian Farm Business Management Journal, 14, Article 1. https://ageconsearch.umn.edu/record/284951/

SatAgro. (2023, 29 de abril). Mapas de prescripción basados en imágenes satelitales. SatAgro.

Scharf, P. C., Schmidt, J. P., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Hong, S. Y., Lory, J. A., & Davis, J. G. (2002). Remote sensing for nitrogen management. Journal of Soil and Water Conservation, 57(6), 518–524.

Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., & Luchiari, A., Jr. (2004). Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. Agronomy Journal, 96(1), 195–203. https://doi.org/10.2134/agronj2004.1950

Simbahan, G. C., Dobermann, A., Goovaerts, P., Ping, J., & Haddix, M. L. (2006). Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. Geoderma, 132(3–4), 471–489. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.001

Teledyne FLIR. (2024, 13 de diciembre). FLIR sUAS cameras radiometric information. https://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/3108/~/flir-suas-cameras-radiometric-information

Thomason, W. E. (2008, 6 de agosto). Variable-rate N fertilization of wheat and corn in Virginia [Presentación de PowerPoint]. University of Maryland Extension. https://ninjaag.com/wp-content/uploads/2020/06/Variable-Rate-N-Fertilization-of-Wheat-and-Corn-in-Virginia.pdf

Trimble Inc. (2023). Field-IQ: Crop input control system. Trimble Agriculture Division.

u-blox. (2026). GPS/GNSS product overview. https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS/GNSS-product_Overview_UBX-14000426.pdf

van der Ploeg, R. R., Böhm, W., & Kirkham, M. B. (1999). On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum. Soil Science Society of America Journal, 63(5), 1055–1062. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351055x

Webster, A. J., Bartley, R., Armour, J. D., Brodie, J. E., & Thorburn, P. J. (2012). Reducing dissolved inorganic nitrogen in surface runoff water from sugarcane production systems. Marine Pollution Bulletin, 65(4–9), 128–135. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.02.023

Xu, X., He, P., Pampolino, M. F., Johnston, A. M., Qiu, S., Zhao, S., Chuan, L., & Zhou, W. (2014). Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. Field Crops Research, 157, 27–34. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.013

Yang, M., Yang, G., Long, H., Wang, L., Liu, H., Wang, J., Zhang, X., Xie, G., Xiao, L., & Chen, E. (2022). Remote sensing prescription for rice nitrogen fertilizer recommendation based on improved NFOA model. Agronomy, 12(8), 1804. https://doi.org/10.3390/agronomy12081804

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture: A worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2–3), 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

Capítulo 8

Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector estará en capacidad de:

1. Comprender los fundamentos del Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades como estrategia fitosanitaria orientada a prevenir, monitorear y controlar organismos nocivos mediante métodos culturales, biológicos, físicos, mecánicos, químicos y tecnológicos.

2. Analizar el aporte de la AP al manejo fitosanitario, reconociendo su capacidad para pasar de aplicaciones uniformes y reactivas hacia intervenciones preventivas, localizadas y basadas en información espacial y temporal.

3. Identificar las principales tecnologías utilizadas en el monitoreo de plagas y enfermedades, incluyendo sensores remotos, drones, cámaras multiespectrales, cámaras térmicas, estaciones agroclimáticas, plataformas SIG, GPS/GNSS/RTK e Internet de las Cosas.

4. Interpretar datos e imágenes agrícolas para detectar anomalías fisiológicas, estrés biótico, focos iniciales de infestación, zonas de riesgo fitosanitario y condiciones ambientales favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades.

5. Elaborar y analizar mapas de infestación, mapas de riesgo, mapas de presencia y zonas prioritarias de intervención, como herramientas para orientar el muestreo dirigido y la aplicación localizada de medidas de control.

6. Evaluar el papel de la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y el análisis de Big data en la predicción de brotes fitosanitarios, la generación de alertas tempranas y la toma de decisiones agronómicas más oportunas.

7. Relacionar el uso de GPS/GNSS, RTK, drones y maquinaria de aplicación variable con la reducción del uso innecesario de agroquímicos, la optimización de recursos, la trazabilidad de las intervenciones y la disminución del impacto ambiental.

8. Valorar críticamente los beneficios, limitaciones y desafíos de implementar el MIPE apoyado en AP, considerando costos, conectividad rural, capacitación técnica, infraestructura tecnológica, sostenibilidad y adaptación a pequeños y medianos productores.

Conceptos clave

- Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades: Estrategia de manejo fitosanitario que combina métodos preventivos, culturales, biológicos, físicos, mecánicos, químicos y tecnológicos para mantener las poblaciones de plagas y patógenos por debajo de niveles económicamente dañinos.

- Plaga agrícola: Organismo animal, generalmente insecto, ácaro, nematodo, molusco o vertebrado, que afecta el crecimiento, desarrollo, rendimiento o calidad del cultivo cuando su población supera ciertos niveles de tolerancia.

- Enfermedad vegetal: Alteración fisiológica o estructural de la planta causada por agentes bióticos como hongos, bacterias, virus, fitoplasmas o nematodos, o por factores abióticos que afectan su funcionamiento normal.

- Patógeno: Organismo capaz de causar enfermedad en las plantas, al interferir con procesos como absorción de agua, fotosíntesis, respiración, transporte de nutrientes o formación de tejidos.

- Estrés biótico: Condición de alteración fisiológica causada por organismos vivos, como insectos, hongos, bacterias, virus, malezas o nematodos, que afectan el desempeño del cultivo.

- Estrés abiótico: Alteración del cultivo provocada por factores no vivos, como déficit hídrico, exceso de humedad, altas temperaturas, salinidad, compactación, toxicidad o deficiencias nutricionales.

- Monitoreo fitosanitario: Proceso sistemático de observación, muestreo y registro de la presencia, intensidad y distribución de plagas y enfermedades en el cultivo.

- Muestreo dirigido: Estrategia de evaluación en campo que prioriza zonas con mayor probabilidad de afectación, identificadas mediante recorridos, sensores, mapas de riesgo, imágenes aéreas o antecedentes del lote.

- Umbral económico: Nivel poblacional de una plaga o intensidad de una enfermedad a partir del cual se justifica una intervención, debido a que el daño esperado puede superar el costo del control.

- Nivel de daño económico: Punto en el que la pérdida causada por una plaga o enfermedad iguala o supera el valor económico de la intervención de manejo.

- Agricultura de precisión fitosanitaria: Aplicación de tecnologías geoespaciales, sensores, análisis de datos y sistemas de aplicación variable para mejorar el monitoreo, diagnóstico y control localizado de plagas y enfermedades.

- Detección temprana: Identificación inicial de síntomas, anomalías fisiológicas o focos de infestación antes de que el daño se generalice en el cultivo.

- Anomalía fisiológica: Cambio anormal en el comportamiento de la planta, expresado en variaciones de color, temperatura, vigor, crecimiento, transpiración o reflectancia, que puede indicar estrés biótico o abiótico.

- Sensor remoto: Dispositivo que obtiene información del cultivo sin contacto directo, mediante la captura de radiación reflejada o emitida por la vegetación desde drones, satélites o aeronaves.

- Sensor proximal: Equipo instalado cerca del cultivo o del suelo que permite medir variables asociadas a humedad, temperatura, conductividad eléctrica, vigor vegetal o condiciones microclimáticas.

- Cámara multiespectral: Sensor que registra información en bandas específicas del espectro electromagnético, útil para evaluar vigor vegetal, clorofila, biomasa y posibles síntomas tempranos de estrés.

- Cámara hiperespectral: Sensor avanzado que capta numerosas bandas estrechas del espectro, permitiendo identificar cambios bioquímicos y fisiológicos sutiles asociados a estrés, enfermedades o deficiencias.

- Cámara térmica: Sensor que mide la temperatura superficial del dosel vegetal, útil para detectar estrés hídrico, cierre estomático, problemas fisiológicos y zonas con comportamiento anormal.

- Índices de vegetación: Relaciones matemáticas calculadas a partir de bandas espectrales, utilizadas para estimar vigor, cobertura, biomasa, clorofila, actividad fotosintética y estrés del cultivo.

- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, empleado para evaluar vigor y actividad fotosintética del cultivo, así como para identificar zonas con bajo desarrollo o posible estrés.

- NDRE: Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo, sensible al contenido de clorofila y útil para detectar cambios fisiológicos en etapas avanzadas del cultivo.

- CWSI: Índice de Estrés Hídrico del Cultivo, calculado a partir de la temperatura del dosel y condiciones ambientales, utilizado

para identificar déficit hídrico y posibles zonas vulnerables a problemas fitosanitarios.

- Dron agrícola: Vehículo aéreo no tripulado equipado con cámaras o sensores, utilizado para monitorear cultivos, generar mapas, detectar focos de estrés y apoyar aplicaciones localizadas.

- Orto mosaico: Imagen aérea corregida geométricamente, construida a partir de múltiples fotografías capturadas por dron, que permite analizar espacialmente el cultivo con alta precisión.

- Mapa de infestación: Representación espacial de la presencia e intensidad de una plaga dentro del lote, utilizada para orientar acciones de control localizado.

- Mapa de enfermedad: Representación georreferenciada de zonas afectadas por una enfermedad, útil para evaluar su distribución, severidad y avance temporal.

- Mapa de riesgo fitosanitario: Herramienta cartográfica que integra variables climáticas, edáficas, fisiológicas y de historial sanitario para identificar áreas con mayor probabilidad de aparición de plagas o enfermedades.

- Zona prioritaria de intervención: Área del cultivo donde las condiciones de riesgo, presencia de plaga o severidad de enfermedad justifican una acción inmediata de manejo.

- Sistema de Información Geográfica: Plataforma digital que permite almacenar, integrar, analizar y visualizar información espacial relacionada con suelo, clima, cultivo, plagas, enfermedades y labores de manejo.

- Georreferenciación: Asignación de coordenadas espaciales precisas a puntos de muestreo, focos de infestación, síntomas, aplicaciones o recorridos de monitoreo.

- GPS/GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite utilizado para ubicar con precisión puntos, trayectorias, maquinaria y zonas de manejo dentro del predio.

- RTK: Corrección cinemática en tiempo real que mejora la precisión del posicionamiento GPS/GNSS hasta niveles centimétricos, facilitando aplicaciones localizadas y recorridos altamente precisos.

- Aplicación localizada: Intervención fitosanitaria dirigida únicamente a las zonas afectadas o de mayor riesgo, reduciendo el uso innecesario de productos en áreas sanas del cultivo.

- Aplicación de tasa variable: Tecnología que ajusta automáticamente la dosis de un producto fitosanitario según la intensidad del problema, el mapa de prescripción o la condición específica de cada zona.

- Mapa de prescripción fitosanitaria: Archivo georreferenciado que indica dónde, cuánto y cómo aplicar una medida de control, según la distribución espacial de la plaga o enfermedad.

- Pulverización de precisión: Aplicación dirigida de productos fitosanitarios mediante equipos capaces de ajustar dosis, caudal, presión o ubicación de aplicación según datos del cultivo.

- Inteligencia artificial: Conjunto de métodos computacionales capaces de analizar datos agrícolas, reconocer patrones, clasificar síntomas y apoyar decisiones fitosanitarias.

- Aprendizaje automático: Rama de la inteligencia artificial que permite entrenar modelos con datos históricos e imágenes para predecir brotes, clasificar daños o identificar enfermedades.

- Visión por computadora: Tecnología que permite a los sistemas digitales interpretar imágenes del cultivo para reconocer síntomas, insectos, manchas, lesiones o anomalías visuales.

- Big data fitosanitario: Conjunto masivo de datos sobre clima, suelo, cultivo, imágenes, sensores, historial de plagas, aplicaciones y rendimiento, utilizado para mejorar el diagnóstico y la predicción sanitaria.

- Modelo predictivo fitosanitario: Herramienta estadística o computacional que estima la probabilidad de aparición o propagación de una plaga o enfermedad con base en datos climáticos, biológicos y espaciales.

- Alerta temprana: Aviso generado por sensores, modelos o plataformas digitales cuando las condiciones del cultivo o del ambiente indican riesgo de aparición o avance de una plaga o enfermedad.

- Estación agroclimática: Equipo que registra variables como temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación, velocidad del viento y mojado foliar, fundamentales para predecir riesgos fitosanitarios.

- Mojado foliar: Tiempo durante el cual la superficie de las hojas permanece húmeda, variable crítica para el desarrollo de muchas enfermedades causadas por hongos y bacterias.

- Internet de las Cosas agrícola: Red de sensores, estaciones, dispositivos y plataformas conectadas que transmiten datos en tiempo real para apoyar el monitoreo y la toma de decisiones en campo.

- Trazabilidad fitosanitaria: Registro georreferenciado de monitoreos, diagnósticos, productos aplicados, dosis, fechas, zonas intervenidas y resultados posteriores al tratamiento.

- Evaluación postaplicación: Seguimiento realizado después de una intervención fitosanitaria para verificar su eficacia, monitorear la evolución del problema y ajustar futuras decisiones.

- Control biológico: Uso de organismos benéficos, enemigos naturales, microorganismos o bioproductos para regular poblaciones de plagas o patógenos.

- Control cultural: Conjunto de prácticas agronómicas, como rotación, poda, manejo de residuos, densidad de siembra, drenaje o selección varietal, orientadas a reducir condiciones favorables para plagas y enfermedades.

- Control químico racional: Uso responsable y técnicamente justificado de productos fitosanitarios, considerando umbrales, dosis, momento de aplicación, selectividad, rotación de ingredientes activos y reducción de impactos ambientales.

- Resistencia a plaguicidas: Capacidad adquirida por poblaciones de plagas o patógenos para tolerar productos que antes eran eficaces, generalmente por uso repetido o inadecuado de los mismos ingredientes activos.

- Manejo de resistencia: Estrategia que combina rotación de modos de acción, uso de dosis adecuadas, monitoreo, control biológico y reducción de aplicaciones innecesarias para preservar la eficacia de los productos.

- Sostenibilidad fitosanitaria: Manejo de plagas y enfermedades orientado a proteger el rendimiento y la calidad del cultivo, reduciendo al mismo tiempo riesgos ambientales, económicos y sociales.

- Salud del agroecosistema: Condición integral del sistema agrícola en la que interactúan suelo, planta, clima, biodiversidad y manejo humano, manteniendo equilibrio funcional y capacidad productiva.

- Manejo fitosanitario preventivo: Enfoque que prioriza la anticipación del riesgo, el monitoreo constante y las intervenciones tempranas antes de que el problema alcance niveles críticos.

- Manejo fitosanitario predictivo: Estrategia apoyada en datos, modelos e inteligencia artificial para anticipar la aparición, distribución o intensidad futura de plagas y enfermedades.

- Manejo fitosanitario prescriptivo: Enfoque que no solo identifica o predice un problema, sino que recomienda acciones específicas de control según la ubicación, severidad y condiciones del cultivo.

Desarrollo técnico

Manejo integrado de plagas y enfermedades

La agricultura moderna enfrenta desafíos crecientes en la gestión de plagas y enfermedades, los cuales afectan de manera directa la productividad de los cultivos y la sostenibilidad ambiental de los sistemas productivos. Durante décadas, gran parte de las estrategias de control se apoyaron en la aplicación uniforme y extensiva de agroquímicos, lo que favoreció el uso excesivo de insumos, la contaminación del ambiente y la aparición de resistencia en poblaciones de plagas, reduciendo la eficacia de los métodos convencionales a largo plazo. Esta problemática fue ampliamente discutida por Tilman, Cassman, Matson, Naylor y Polasky (2002), quienes advirtieron que la intensificación agrícola mal gestionada puede generar altos costos ecológicos y productivos.

En este contexto, la AP se ha consolidado como un enfoque transformador que busca optimizar la aplicación de insumos, incluidos insecticidas y fungicidas, a partir de la variabilidad espacial y temporal del cultivo. McBratney, Whelan, Ancev y Bouma (2005) señalaron que este paradigma depende de la generación de decisiones específicas basadas en información espacial, mientras que Gebbers y Adamchuk (2010) mostraron que el valor real de estas tecnologías radica en convertir datos en acciones agronómicas concretas. Dentro de este marco, los sistemas globales de navegación por satélite, el posicionamiento preciso y las herramientas geoespaciales permiten localizar focos de infestación, ajustar tratamientos y reducir aplicaciones innecesarias.

El manejo integrado de plagas y enfermedades ha evolucionado de forma sustancial gracias a la incorporación de tecnologías digitales y herramientas propias de la AP. De manera general, el MIPE puede entenderse como una estrategia de decisión que integra métodos biológicos, culturales, físicos, mecánicos y químicos con el fin de mantener las poblaciones de organismos nocivos por debajo del umbral económico de daño, reduciendo a la vez los riesgos para la salud humana y el ambiente. La recopilación de definiciones históricas del concepto muestra que esta visión se ha mantenido como eje central del manejo integrado, particularmente en la formulación atribuida a Kogan (1998), que resalta la combinación racional de tácticas compatibles para minimizar riesgos económicos, sanitarios y ambientales.

En el contexto de la AP, la gestión de plagas y enfermedades se apoya en la detección temprana, el monitoreo continuo, la toma de decisiones localizada y la aplicación diferenciada de medidas de control. Para ello se utilizan sensores remotos, cámaras multiespectrales y térmicas, drones, estaciones meteorológicas automáticas, sistemas de información geográfica, modelos de aprendizaje automático y plataformas de análisis de datos. Estas herramientas permiten detectar alteraciones fisiológicas sutiles antes de que los síntomas visibles sean evidentes y, además, facilitan la predicción de brotes fitosanitarios con base en variables ambientales y espaciales. Un ejemplo sólido de esta capacidad fue documentado por Zarco-Tejada et al. (2018), quienes demostraron que la espectroscopía de alta resolución y la termografía aérea pueden revelar infecciones en etapas presintomáticas.

Las metodologías más comunes dentro de este enfoque incluyen la teledetección mediante satélites, aeronaves y drones, así como el análisis de índices espectrales asociados con el estado fisiológico del cultivo. Cambios en variables como el NDVI, el borde rojo o la respuesta térmica del dosel pueden indicar estrés biótico o predisposición al desarrollo de enfermedades. Una vez procesada, esta información puede transformarse en mapas de riesgo, mapas de presencia o zonas prioritarias de muestreo, lo que permite focalizar las labores de control y disminuir el impacto ambiental del manejo fitosanitario.

Además de la teledetección, los sensores de campo y los dispositivos IoT permiten monitorear variables micro ambientales como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y duración del mojado foliar. Estos datos alimentan modelos epidemiológicos y sistemas de alerta temprana que ayudan a anticipar condiciones favorables para patógenos e insectos. En paralelo, la inteligencia artificial ha impulsado el desarrollo de sistemas expertos y aplicaciones móviles capaces de diagnosticar enfermedades a partir de imágenes de hojas, frutos o tallos. Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018) mostraron que el aprendizaje profundo ha alcanzado desempeños muy altos en clasificación y reconocimiento de problemas agrícolas, lo que ha ampliado notablemente las posibilidades de automatización del diagnóstico fitosanitario.

En lo referente al control, la AP ha favorecido la aplicación variable y dirigida de productos fitosanitarios. Esta modalidad disminuye el volumen total de agroquímicos aplicados, reduce la exposición de los trabajadores y limita la contaminación del suelo y del agua. El desarrollo de pulverizadores inteligentes con control por boquilla, navegación satelital y automatización de la dosificación ha hecho posible tratar únicamente las zonas afectadas o con mayor probabilidad de infección. En términos operativos, este cambio representa una transición desde esquemas generalizados de control hacia una gestión espacialmente diferenciada y más eficiente.

A pesar de sus beneficios, la implementación del MIPE con AP todavía enfrenta limitaciones importantes, entre ellas el costo inicial de los equipos, la conectividad insuficiente en muchas zonas rurales, la necesidad de personal capacitado para interpretar información geoespacial y la baja interoperabilidad entre plataformas tecnológicas. Sin embargo, la tendencia actual apunta a un manejo fitosanitario digitalizado, en el que sensores, modelos predictivos, sistemas automáticos y robótica trabajen de forma coordinada. Esta transición se alinea con los principios de una agricultura más regenerativa, resiliente y climáticamente inteligente, donde el objetivo no es únicamente erradicar organismos dañinos, sino comprender su dinámica ecológica y actuar con mayor precisión sobre el sistema productivo.

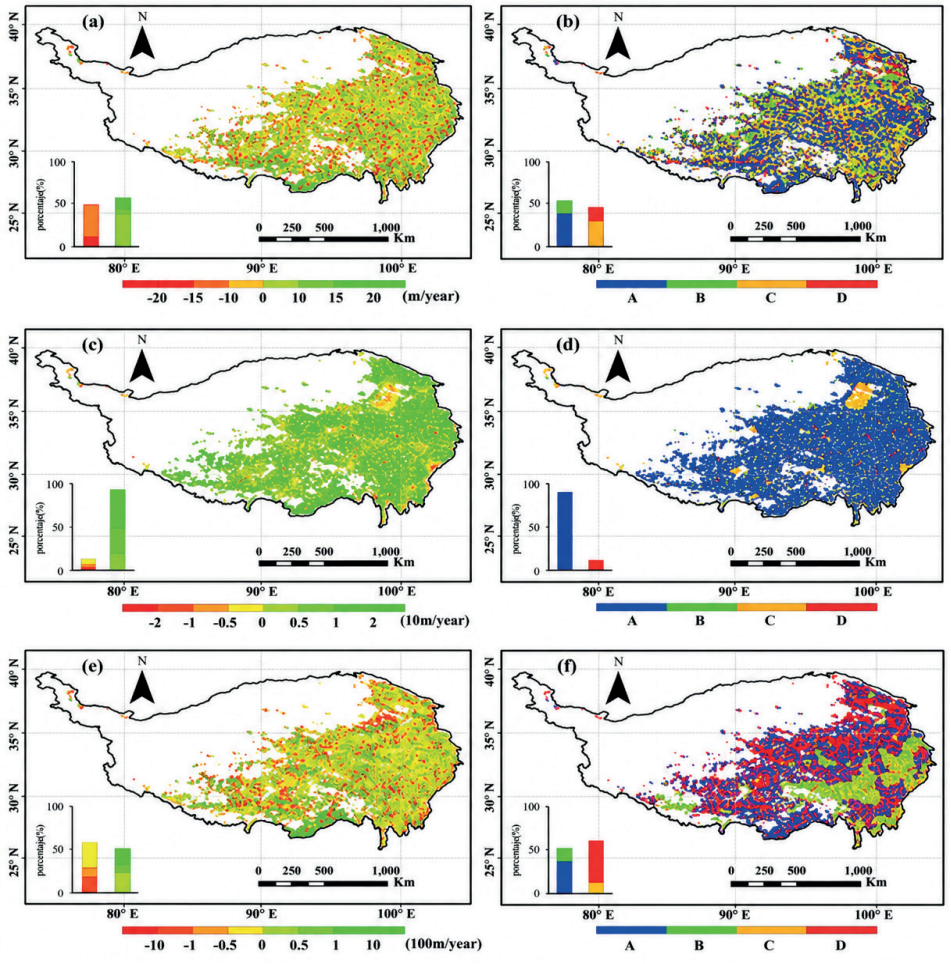
1. Identificación temprana con herramientas de precisión.

La identificación temprana de plagas y enfermedades mediante herramientas de precisión constituye uno de los avances más relevantes de la agricultura moderna. Su importancia radica en que permite detectar alteraciones fisiológicas o ambientales antes de que el daño sea claramente visible, facilitando intervenciones preventivas, selectivas y más eficaces. Dentro del MIPE, esta capacidad cambia de manera sustancial la lógica del manejo, ya que reemplaza respuestas tardías por decisiones oportunas basadas en evidencia espacial y temporal del cultivo.

La evolución de esta estrategia comenzó a finales del siglo XX, con los primeros ensayos de sensores remotos y observación satelital orientados a detectar cambios sutiles en el vigor vegetal. Desde entonces, el desarrollo de sensores multiespectrales e hiperespectrales, cámaras térmicas, sistemas de visión artificial y algoritmos de inteligencia artificial ha permitido diagnosticar y predecir la aparición de enfermedades e infestaciones con niveles crecientes de precisión. Zarco-Tejada et al. (2018) demostraron que ciertas alteraciones fisiológicas pueden detectarse en etapas previas a la expresión visual del daño, lo que confirma el potencial de estas tecnologías para la vigilancia fitosanitaria temprana (ver figura 1).

En la actualidad, la identificación temprana se realiza mediante varias modalidades complementarias. Entre ellas se incluyen sensores montados en drones o satélites, estaciones meteorológicas automáticas, trampas inteligentes y dispositivos IoT instalados directamente en el campo. El análisis de índices espectrales como NDVI, NDRE y PRI permite detectar cambios en la reflectancia asociados con estrés causado por insectos, ácaros, bacterias, virus u hongos. A esto se suma el uso de cámaras térmicas, que permiten reconocer incrementos anómalos en la temperatura foliar, frecuentemente relacionados con alteraciones en la transpiración y el funcionamiento estomático. Cuando esta información se integra con modelos meteorológicos y fenológicos, es posible identificar ventanas de vulnerabilidad y diseñar intervenciones mucho más precisas.

Figura 1. *Efectos contrastantes de la temperatura y la precipitación sobre la vegetación e incidencia de plagas a lo largo de los gradientes de altitud.*



Fuente: Wang, et al., (2020)

Entre las herramientas más utilizadas actualmente se encuentran los drones con sensores multiespectrales, las aplicaciones móviles basadas en visión artificial y las redes neuronales convolucionales entrenadas con grandes bases de imágenes de tejidos vegetales. Estas herramientas han mejorado notablemente la detección automatizada de patrones visuales vinculados con enfermedades, reduciendo errores humanos y agilizando el diagnóstico. Los sensores de suelo y las estaciones microclimáticas complementan este proceso al aportar información crítica sobre humedad, temperatura, precipitación y punto de rocío, variables indispensables para los modelos epidemiológicos de enfermedades foliares.

A escala internacional, uno de los ejemplos más relevantes es la detección temprana de infecciones en cultivos leñosos mediante imagen hiperespectral y térmica, que ha mostrado resultados promisorios para enfermedades difíciles de identificar visualmente en estados iniciales. En sistemas hortícolas y frutales, la integración entre drones, sensores y modelos de aprendizaje profundo también ha fortalecido el monitoreo localizado de plagas y enfermedades. En Colombia, aunque la adopción todavía es heterogénea, el interés por estas herramientas ha crecido en cultivos como café, cacao y hortalizas, especialmente en procesos de diagnóstico temprano y monitoreo de focos fitosanitarios.

La identificación temprana con herramientas de precisión representa, por tanto, un cambio profundo en la manera de enfrentar los problemas sanitarios de la agricultura contemporánea. Al integrar sensores, inteligencia artificial, análisis espacial y plataformas digitales, este enfoque mejora la eficacia del control, promueve un uso racional de insumos y fortalece la sostenibilidad general de los sistemas productivos. Su expansión futura dependerá de la accesibilidad de la tecnología, de la formación de los usuarios y de la capacidad institucional para adaptar estas herramientas a distintos contextos productivos.

2. Uso de drones en el manejo de plagas y enfermedades

El uso de drones en agricultura ha transformado de manera significativa las prácticas de monitoreo y manejo de plagas y enfermedades. Estos vehículos aéreos no tripulados permiten adquirir información de alta resolución espacial y temporal, lo que facilita tanto la vigilancia del cultivo como la toma de decisiones focalizadas. Equipados con cámaras RGB, multiespectrales, térmicas o hiperespectrales, los drones se han convertido en una herramienta central para la AP, especialmente en escenarios donde la detección temprana y la intervención localizada son fundamentales.

En el marco del MIPE, los drones permiten identificar signos tempranos de infestación o enfermedad antes de que el daño sea visible a escala de campo. La información capturada puede emplearse para construir mapas de vigor, estrés o riesgo fitosanitario, con los cuales el agricultor puede decidir dónde muestrear, dónde intervenir primero y dónde evitar aplicaciones innecesarias. Este uso selectivo de la información mejora la eficiencia del control y reduce el volumen total de pesticidas aplicados, lo que fortalece la sostenibilidad del sistema.

El empleo de drones se consolidó a comienzos del siglo XXI, impulsado por los avances en sensores remotos, navegación satelital, baterías y procesamiento digital de imágenes. Inicialmente, su función principal fue el monitoreo aéreo del cultivo, pero con el tiempo su uso se amplió a tareas operativas como la aplicación dirigida de insumos y la construcción de mapas para manejo variable. Las revisiones recientes muestran que su principal fortaleza radica en ofrecer información de muy alta resolución y en permitir decisiones rápidas en escalas intra prediales.

En Colombia, el uso de drones en agricultura ha aumentado de manera visible en cultivos de importancia económica, especialmente donde las condiciones topográficas o la necesidad de intervención puntual dificultan el manejo convencional. Más que una sustitución total de la maquinaria terrestre, los drones se han convertido en una herramienta complementaria

para monitoreo, diagnóstico y, en ciertos casos, aplicación localizada de insumos, con ventajas importantes en accesibilidad, rapidez de cobertura y reducción de exposición directa de los operarios a productos fitosanitarios.

Desde la perspectiva operativa, la principal ventaja de los drones en el manejo fitosanitario es que pueden actuar únicamente sobre las zonas que realmente lo requieren. Esto significa que la aplicación de fertilizantes foliares, bioinsumos, fungicidas o insecticidas puede orientarse a focos específicos de infestación o enfermedad, disminuyendo el desperdicio de producto y limitando la contaminación del entorno. Además, al operar sobre superficies delimitadas por análisis previos, los drones se articulan de forma natural con los principios de la aplicación variable y del manejo sitio-específico.

Ahora, Los drones nos permiten una variedad de aplicaciones precisas en diferentes modalidades localizadas en el manejo agrícola, optimizando las intervenciones (ver tabla 1):

Tabla 1. *Aplicaciones de los drones en el manejo agrícola de precisión*

Aplicación	Descripción con autores citados dentro del texto	Implicación agronómica
Aplicación variable de insumos	Tsouros, Bibi y Sarigiannidis (2019) describen que los UAV se emplean en AP para generar información espacial de alta resolución y apoyar decisiones de manejo sitio-específico, mientras que Kumar y Sriram (2024) señalan que las zonas de manejo derivadas de índices como NDVI pueden utilizarse para adoptar prácticas de tasa variable.	Permiten aplicar fertilizantes, pesticidas u otros insumos con dosis diferenciadas según la variabilidad intra-predial, mejorando la eficiencia de uso y reduciendo desperdicios.

Aplicación	Descripción con autores citados dentro del texto	Implicación agronómica
Monitoreo fitosanitario y nutricional	Tsouros et al. (2019) reportan que entre las aplicaciones más comunes de los drones están el monitoreo de la salud de la vegetación, la detección de enfermedades y la gestión del riego, y Rejeb, Abdollahi, Rejeb y Treiblmaier (2022) muestran que el monitoreo remoto, la AP y el aprendizaje automático son núcleos centrales en la literatura sobre drones agrícolas. Kumar y Sriram (2024) añaden que los drones se usan para detección temprana de enfermedades, estrés hídrico y estrés nutricional.	Facilitan intervenciones focalizadas y tempranas frente a plagas, enfermedades o deficiencias nutricionales, disminuyendo el uso generalizado de agroquímicos y favoreciendo un manejo más sostenible.
Siembra aérea y reforestación asistida	Mohan et al. (2021) indican que la siembra apoyada por UAV puede promover procesos rápidos de forestación y reforestación de forma segura, rentable, rápida y ambientalmente amigable, especialmente en terrenos inseguros o inaccesibles. Su revisión identifica aplicaciones en restauración post-incendio, restauración de manglares, restauración forestal tras degradación y reverdecimiento de zonas áridas.	Esta tecnología resulta útil para restauración ecológica, revegetación de áreas degradadas y establecimiento de cultivos o coberturas en zonas donde la topografía dificulta el uso de maquinaria convencional.

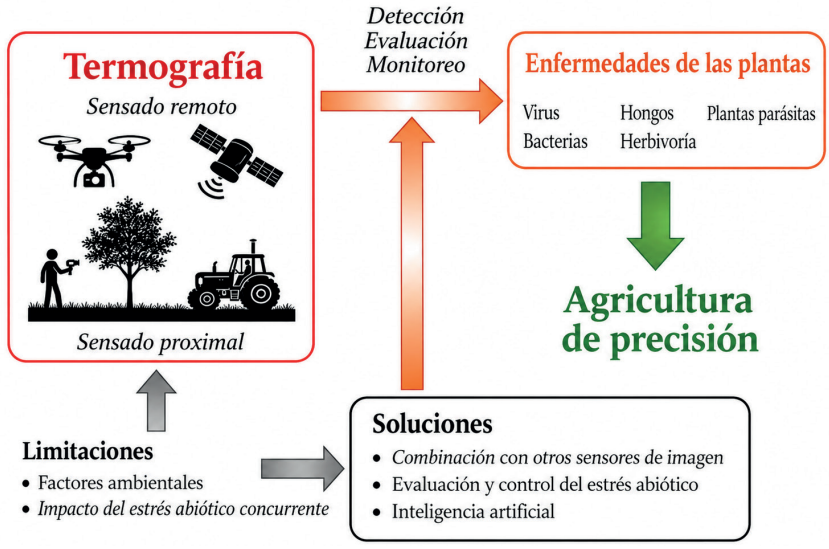
Fuente: Esta investigación

3. Cámaras térmicas en el manejo de plagas y enfermedades en cultivos agrícolas

Las cámaras térmicas, también denominadas cámaras infrarrojas, se han consolidado como herramientas relevantes dentro de la AP, especialmente en la gestión integrada de plagas y enfermedades (ver figura 2) . Su utilidad radica en que detectan la radiación infrarroja emitida por la vegetación y permiten identificar variaciones sutiles de temperatura asociadas con alteraciones fisiológicas del cultivo. En plantas afectadas por patógenos, insectos o estrés hídrico, es común observar cambios en la temperatura del dosel debido a modificaciones en la transpiración y en

la conductancia estomática, lo que convierte a la termografía en una vía eficaz para la detección temprana de problemas antes de que los síntomas sean evidentes a simple vista, como mostraron Zarco-Tejada et al. (2018).

Figura 2. *Aplicación de la termografía en la detección, evaluación y monitoreo de enfermedades de las plantas para la AP*



Fuente: Generado por IA

Además de su valor fitosanitario, la termografía aporta de manera significativa a la gestión eficiente del recurso hídrico. La temperatura del dosel constituye un indicador ampliamente utilizado para detectar estrés hídrico y para respaldar decisiones de riego más precisas, permitiendo dirigir el agua hacia las zonas que realmente la requieren. En este sentido, Parihar, Saha y Giri (2021) señalaron que la termografía infrarroja posee aplicaciones directas en la programación del riego, la detección temprana del estrés y el monitoreo fisiológico de las plantas, lo que refuerza su utilidad dentro de sistemas productivos orientados a la sostenibilidad y a la eficiencia en el uso del agua.

La adopción de cámaras térmicas en agricultura ha crecido de forma sostenida a escala internacional, tanto en cultivos extensivos como en sistemas intensivos y de alto valor comercial. Su integración con drones, plataformas de monitoreo proximal y software fotogramétrico ha ampliado las posibilidades de diagnóstico espacial, seguimiento del vigor del cultivo y construcción de mapas térmicos para la toma de decisiones. De manera complementaria, Gerhards, Schlerf, Mallick y Udelhoven (2019) destacaron que los sensores térmicos son especialmente útiles para la detección del estrés hídrico, mientras que Velazquez-Chavez, Daccache, Mohamed y Centritto (2024) advirtieron que su interpretación debe realizarse junto con información agronómica, fisiológica y ambiental, debido a la influencia que ejercen la arquitectura del dosel, las deficiencias nutricionales, las enfermedades y las condiciones microclimáticas sobre la respuesta térmica observada.

3.1. FLIR Systems: el líder global en cámaras térmicas

FLIR ha desarrollado una línea ampliamente utilizada de cámaras térmicas para aplicaciones profesionales, científicas y móviles. En el ámbito agrícola, estos equipos son valorados por su capacidad para registrar variaciones de temperatura y por su potencial de integración con otras plataformas de monitoreo. En particular, Teledyne FLIR describe la FLIR ONE Pro como una cámara térmica de nivel profesional para teléfonos inteligentes, orientada a inspecciones de proximidad y al diagnóstico rápido en campo, con capacidades de visualización térmica y mejora de imagen mediante MSX. En consecuencia, puede considerarse una herramienta útil para inspecciones preliminares, observación rápida de anomalías térmicas y apoyo al reconocimiento inicial de variaciones espaciales en tejidos vegetales. No obstante, por su naturaleza portátil y por su enfoque operativo de corto alcance, su uso no sustituye el desempeño de cámaras térmicas especializadas integradas en drones o en sistemas fijos de monitoreo, las cuales ofrecen mayores posibilidades para levantamientos espaciales continuos y análisis térmicos de escala agronómica; esta última comparación se desprende del posicionamiento de la FLIR ONE Pro como

dispositivo móvil de inspección y del uso de cámaras térmicas aéreas de alta resolución en investigación de cultivos reportado por FLIR. (ver figura 3).

Figura 3. *Cámara térmicas portable FLIR T&3Osc-25*



Fuente: Modificado de FLIR. (2025).

3.2. DJI Zenmuse XT2 y XT S: integración perfecta con drones agrícolas

Las cámaras térmicas Zenmuse XT2 y Zenmuse XT S, desarrolladas por DJI con tecnología FLIR, se han posicionado como soluciones relevantes para operaciones aéreas con drones, especialmente por su integración con plataformas de la línea empresarial de DJI y por sus capacidades de adquisición térmica para inspección y monitoreo. En particular, DJI indica que la Zenmuse XT2 integra una cámara térmica y una cámara visual independiente de 12 MP, lo que permite registrar información térmica y visual de manera simultánea. Por su parte, DJI y DJI (2019) señalan que la Zenmuse XT S fue concebida como una cámara térmica radiométrica de alta sensibilidad, con resolución de 640 × 512 píxeles, frecuencia de 25 Hz, lente de 19 mm y capacidades de zoom digital, orientada a la captura térmica detallada y a la obtención rápida de información en campo (ver figura 4).

En aplicaciones agrícolas, estas características resultan especialmente valiosas para identificar anomalías espaciales en el cultivo, delimitar focos de estrés térmico y construir mapas de variabilidad térmica que apoyen el monitoreo y la priorización de intervenciones; esta utilidad se infiere de sus prestaciones de adquisición y análisis térmico y de su uso en plataformas aéreas de observación de alta resolución.

Figura 4. *Cámara térmica DJI Zenmuse XT2*



Fuente: DJI, (2019)

3.3. Thermal by FLIR en smartphones y tablets

Una tendencia reciente en la termografía aplicada a la agricultura es el uso de cámaras térmicas portátiles conectables a dispositivos móviles, como la FLIR ONE Pro. Teledyne FLIR (ver figura 5) indica que este equipo puede acoplarse a teléfonos inteligentes y tabletas compatibles, y que dispone de una resolución térmica nativa de 160 × 120 píxeles, super resolución de 480 × 360, además de funciones de mejora de imagen como MSX y VividIR, lo que la convierte en una alternativa útil para inspecciones

rápidas de proximidad y para el reconocimiento preliminar de variaciones térmicas en campo. Aunque se trata de un sensor portátil de bajo costo y de menor alcance operativo que los sistemas térmicos profesionales o aerotransportados, Pappalardo et al. (2023) demostraron que la FLIR ONE Pro presentó una confiabilidad adecuada en la medición de temperatura y un buen desempeño para estimar el índice de estrés hídrico del cultivo en cítricos, lo que respalda su utilidad como herramienta práctica de apoyo al monitoreo hídrico. En una perspectiva más amplia, Shoaib et al. (2025) señalaron que las plataformas portátiles y basadas en teléfonos inteligentes están contribuyendo a democratizar el acceso al diagnóstico del estrés vegetal, aunque su interpretación debe mantenerse articulada con protocolos de campo y otros indicadores agronómicos.

Figura 5. *Cámara térmica para teléfonos inteligentes y tablets*



Fuente: Modificado de FLIR. (2025).

3.4. Cámaras Optris PI: precisión en análisis científico y estaciones fijas

Las cámaras térmicas de la serie Optris PI (ver figura 6), aunque menos difundidas en el mercado agrícola comercial generalista, han sido empleadas en investigación para el análisis térmico de plantas, el seguimiento de la temperatura foliar y el estudio de procesos vinculados con la transpiración. Optris GmbH, (2024) señala que la PI 640i está orientada a aplicaciones de investigación e ingeniería, dispone de resolución de 640 × 480 píxeles y alcanza una sensibilidad térmica de hasta 25 mK, características que favorecen su uso en montajes experimentales y en sistemas de monitoreo térmico continuo. En esa misma línea, Manickathan et al. (2022) utilizaron una cámara Optris PI 640 para registrar la historia espaciotemporal de la temperatura foliar y analizar su relación con la transpiración y la dinámica microclimática de la planta.

Figura 6. *Cámaras Optris PI*



Fuente: Modificado de Optris GmbH, (2024)

3.5. Cámaras Seek Thermal: asequibles y funcionales para agricultura familiar

Las cámaras Seek Thermal CompactPRO constituyen una alternativa portátil y de menor barrera de entrada para el monitoreo térmico de

proximidad en agricultura. Seek Thermal indica que este modelo se conecta directamente a teléfonos inteligentes iPhone y Android, incorpora un sensor térmico de 320 × 240 píxeles, un campo de visión de 32° y ajustes de emisividad, lo que permite realizar inspecciones rápidas sobre hojas, tallos, frutos y otras superficies vegetales. Por ello, su principal fortaleza no radica en sustituir sistemas térmicos profesionales montados en drones o estaciones fijas, sino en facilitar evaluaciones preliminares en campo, especialmente en predios pequeños o en actividades de asistencia técnica de respuesta rápida. Además, la literatura reciente muestra que las plataformas térmicas portátiles y de bajo costo están ampliando el acceso al diagnóstico del estrés vegetal y al monitoreo hídrico en condiciones operativas más sencillas, aunque su interpretación debe complementarse con observaciones agronómicas y ambientales de campo; en cítricos, por ejemplo, Pappalardo et al. (2023) reportaron un buen nivel de concordancia entre un sensor portátil de bajo costo conectado a smartphone y una cámara térmica profesional para la estimación del estado hídrico.

En lugar de atribuir, sin respaldo documental específico, su uso creciente a capacitaciones rurales, ONG o asociaciones de productores concretas, resulta más riguroso afirmar que este tipo de dispositivos contribuye a reducir las barreras económicas y logísticas de entrada a la termografía aplicada. En esa línea, Shoaib et al. (2025) señalan que los avances en sensores de imagen y cámaras acopladas a teléfonos inteligentes han hecho viables plataformas de bajo costo y desplegables en campo para el monitoreo del estrés de las plantas en tiempo real.

En el contexto de la AP, la selección de una cámara térmica depende del cultivo, la escala de trabajo, el presupuesto disponible, el nivel de tecnificación del predio y el objetivo del monitoreo. Las soluciones portátiles, como Seek Thermal, resultan útiles para diagnóstico rápido de proximidad; las cámaras térmicas integradas a drones ofrecen mayor cobertura espacial y mejor capacidad para construir mapas de variabilidad; y los sistemas de mayor especialización permiten análisis térmicos más robustos para investigación o decisiones de manejo avanzado. Por ello, más que establecer

jerarquías absolutas entre marcas, conviene diferenciar su utilidad según el tipo de operación, la resolución requerida y la integración con otras plataformas de captura y análisis.

Los sistemas GPS/GNSS y RTK continúan siendo la base geoespacial de muchas operaciones de AP. Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004) ya advertían que la AP sustituye parte del uso indiscriminado de insumos por información espacialmente explícita, mientras que desarrollos más recientes muestran que las correcciones RTK permiten precisiones centimétricas para guiado y georreferenciación. De acuerdo con u-blox (2026), las soluciones Network RTK pueden alcanzar precisiones del orden de 1–2 cm en aplicaciones exigentes, y Kowalczyk y Hadas (2024) reportaron que, bajo condiciones favorables, la precisión pass-to-pass al 95 % fue mejor que 4.5 cm para RTK, lo que confirma su relevancia para navegación asistida, guiado automático y aplicaciones localizadas de insumos.

De forma complementaria, el procesamiento y análisis de la información capturada por drones depende de software especializado. DJI (2026) describe a DJI Terra como una plataforma capaz de generar reconstrucciones precisas en 2D y 3D a partir de imágenes de luz visible y datos LiDAR; Agisoft (2024) señala que Metashape permite construir modelos digitales de elevación, ortomosaicos y productos derivados, incluso a partir de imágenes térmicas; PIX4D (2026) destaca que PIX4Dfields transforma imágenes de drones y satélites en mapas de salud del cultivo, zonificación y mapas de prescripción; y DroneDeploy (2025, 2026) resalta que sus capas de salud vegetal, índices y zonas de manejo facilitan la identificación de variabilidad, el seguimiento del estrés y la exportación de capas útiles para decisiones agronómicas. En conjunto, estas herramientas convierten las imágenes aéreas en productos cartográficos y analíticos que sustentan una gestión agrícola diferenciada según la variabilidad espacial del lote.

4. Sistemas GPS/GNSS y RTK en agricultura de precisión

4.1. GPS/GNSS: El posicionamiento como pilar de la agricultura de precisión

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GPS/GNSS) constituyen el conjunto de constelaciones satelitales que suministran servicios de posicionamiento, navegación y tiempo a escala global o regional. Dentro de los sistemas más reconocidos se encuentran GPS, desarrollado por Estados Unidos; GLONASS, operado por Rusia; Galileo, administrado por la Unión Europea; y BeiDou, gestionado por China. En términos operativos, estos sistemas permiten que un receptor en tierra calcule su posición a partir de señales satelitales, convirtiéndose en la base geoespacial sobre la cual se estructuran numerosas aplicaciones de AP, tal como explican Misra y Enge (2011) y la documentación técnica oficial de GPS.gov.

En agricultura, la incorporación de receptores GPS/GNSS en tractores, pulverizadores, sembradoras, cosechadoras y sensores móviles permite organizar el manejo del lote a partir de su variabilidad espacial. Corwin (2013) señala que un sistema de manejo sitio-específico se apoya, entre otros componentes, en el referenciamiento espacial, el monitoreo de atributos del suelo, cultivo y ambiente, el mapeo de dichos atributos y la ejecución diferencial de acciones de manejo. Bajo esta lógica, el GPS/GNSS hace posible la elaboración de mapas de rendimiento, mapas de propiedades del suelo, mapas de infestación o focos de enfermedad y otras capas temáticas indispensables para delimitar unidades de manejo. Del mismo modo, Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004) explican que la AP sustituye parte del uso uniforme de insumos por información espacialmente explícita, lo que mejora la eficiencia productiva y ambiental.

Desde el punto de vista operativo, el GPS/GNSS también facilita el guiado de maquinaria y la georreferenciación de datos procedentes de múltiples sensores. Gracias a ello, la información capturada por cámaras multiespectrales, térmicas, sensores de clorofila o sensores de

suelo puede asociarse con coordenadas precisas y luego integrarse en sistemas de información geográfica, modelos de decisión o plataformas de prescripción variable. Sin embargo, el posicionamiento autónomo o estándar no siempre ofrece la resolución requerida para labores agrícolas de alta exigencia espacial. De acuerdo con GPS.gov, el servicio GPS estándar mantiene errores horizontales globales promedio del orden de varios metros, mientras que Trimble y u-blox indican que las soluciones con correcciones RTK pueden trabajar en el rango centimétrico. Por ello, el GPS/GNSS sin corrección puede ser suficiente para navegación general y algunas tareas de reconocimiento, pero resulta limitado para siembra de precisión, tráfico controlado, pulverización dirigida o aplicaciones localizadas de insumos.

4.2. RTK: Llevando la precisión al centímetro

El Posicionamiento Cinemático en Tiempo Real, conocido como RTK (ver figura 7), es una técnica de corrección diferencial que incrementa notablemente la exactitud del posicionamiento GPS/GNSS. En este esquema intervienen, al menos, un receptor móvil o rover y una fuente de correcciones proveniente de una estación base o de una red de estaciones base. Trimble explica que el RTK proporciona precisión centimétrica al eliminar errores presentes en el sistema GPS/GNSS y que el rover puede recibir dichas correcciones mediante radio, módem celular, Wi-Fi o servicios en red. A su vez, u-blox reporta que el RTK puede alcanzar precisiones de 1 a 2 cm en tiempos de inicialización muy cortos, mientras que Kowalczyk y Hadas (2024) encontraron que, en condiciones favorables, la precisión pass-to-pass al 95 % para RTK fue mejor que 4.5 cm.

Esta mejora de la exactitud tiene implicaciones directas para el manejo fitosanitario y agronómico de alta precisión. En primer lugar, permite ejecutar aplicaciones localizadas de agroquímicos, agua, semillas o fertilizantes con un nivel de ajuste espacial mucho mayor que el posible con posicionamiento autónomo. En segundo lugar, favorece la repetibilidad de pasadas, aspecto clave cuando se requiere volver exactamente sobre franjas tratadas, líneas de siembra, zonas de infestación o puntos de monitoreo

permanente. En tercer lugar, la precisión centimétrica del RTK constituye una base tecnológica esencial para la automatización del guiado de maquinaria, el tráfico controlado y la operación de plataformas robóticas o semiautónomas en campo. Estas ventajas son coherentes con lo descrito por Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004) sobre el uso eficiente de insumos en AP y con los componentes del manejo sitio-específico sintetizados por Corwin (2013).

Figura 7. *Estación base RTK*



Fuente: Modificado de SymAgri. (2024).

4.3. Aplicaciones de GPS/GNSS y RTK en el control de plagas y enfermedades

La articulación entre los sistemas GPS/GNSS y RTK hace posible la implementación de estrategias avanzadas y altamente eficientes para la gestión de plagas y enfermedades en los agroecosistemas. Esta integración tecnológica permite pasar de una aplicación tradicionalmente reactiva de insumos a intervenciones de carácter preventivo, espacialmente localizadas y optimizadas de acuerdo con la variabilidad del cultivo y del terreno.

4.3.1. Detección y mapeo de zonas afectadas

De manera complementaria, los vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras multiespectrales, térmicas o hiperespectrales amplían notablemente la capacidad de detección espacial. Zhang et al. (2025) señalan que los UAV con sensores multiespectrales se han convertido en herramientas de gran valor para el monitoreo del crecimiento, la identificación de plagas y enfermedades, y la generación de índices de vegetación en AP. En la misma línea, Shahi et al. (2023) destacan que los enfoques basados en UAV y aprendizaje profundo han fortalecido la detección de enfermedades de los cultivos mediante imágenes de alta resolución, lo que favorece diagnósticos más tempranos y escalables. Por ello, resulta más riguroso afirmar que estas plataformas permiten identificar patrones de estrés y delimitar zonas de intervención con alta resolución espacial, antes que asegurar de forma generalizada que siempre detectan todas las afecciones antes de que sean visibles a simple vista.

4.3.2. Aplicación variable de agroquímicos

Una vez identificadas y cartografiadas las zonas afectadas, la información georreferenciada puede convertirse en mapas de prescripción para ejecutar aplicaciones diferenciadas de agroquímicos. Radočaj et al. (2023) explican que los sistemas de tasa variable basados en mapas utilizan el posicionamiento GPS/GNSS para realizar aplicaciones sitio-específicas de insumos, entre estos "pesticidas". A una escala más amplia, Anastasiou et al. (2023), en un metaanálisis de 239 estudios sobre tecnologías de AP aplicadas a protección vegetal, concluyeron que estas herramientas pueden reducir de forma importante el uso de productos fitosanitarios y el área que requiere tratamiento, aunque la magnitud del ahorro depende del cultivo, la plaga, el sensor y el sistema de aplicación utilizado.

En la pulverización de tasa variable, los pulverizadores equipados con GPS/GNSS o RTK y controladores electrónicos ajustan automáticamente la dosis según el mapa de prescripción y la posición del equipo dentro del

lote. Esta lógica permite aplicar el producto únicamente donde se requiere y en la dosis prevista para cada unidad de manejo, mejorando la eficiencia y disminuyendo solapamientos o aplicaciones innecesarias. Además, los desarrollos recientes muestran que los equipos modernos incorporan control automático por secciones, control individual de boquillas y sistemas PWM, lo que incrementa la precisión de la aplicación en condiciones operativas reales. Meena et al. (2024) señalan que los pulverizadores modernos con control individual de boquillas y tecnología PWM poseen capacidades avanzadas para variar dosis con base en mapas de prescripción, mientras que Motalab y Al-Mallahi (2024) demostraron la viabilidad de controlar boquillas individualmente para aplicaciones puntuales basadas en detección en tiempo real.

En los sistemas más avanzados, el control por secciones o boquilla por boquilla permite cerrar automáticamente los puntos de descarga en zonas ya tratadas, bordes del lote o áreas ambientalmente sensibles, reduciendo omisiones y traslapes. Este principio también ha sido incorporado en tecnologías comerciales de control individual, reportadas por ASABE, para compensar superposiciones por GPS y mejorar la exactitud de la aplicación. No obstante, conviene evitar presentar esta capacidad como una solución perfecta, ya que su desempeño depende de la latencia del sistema, la velocidad de avance, el tiempo de respuesta del controlador y la calidad del posicionamiento.

La inyección directa, por su parte, representa una alternativa de alto interés para aplicaciones sitio-específicas, porque permite dosificar el producto cerca del punto de salida sin necesidad de preparar toda la mezcla en el tanque principal. Sin embargo, Qiu et al. (1998) mostraron que la precisión de estos sistemas depende fuertemente del lugar de mezcla en línea, el diámetro de las mangueras, la distancia hasta la boquilla y la velocidad de avance; de hecho, reportaron retrasos y errores de aplicación cuando el diseño hidráulico no era el adecuado. Por eso, es más apropiado describir la inyección directa como una tecnología prometedora para manejo localizado de insumos, pero todavía sensible al diseño del sistema y a la sincronización entre detección, mezcla y descarga (ver figura 8).

Figura 8. *Dron con pulverización de tasa variable*



Fuente: Esta investigación

4.3.3. Monitoreo y evaluación de la eficacia

Los sistemas GPS/GNSS/RTK empleados en la aplicación de insumos también pueden utilizarse de manera eficaz en el monitoreo posterior a la intervención, lo que permite evaluar con mayor rigurosidad la respuesta del cultivo y la eficacia de los tratamientos realizados.

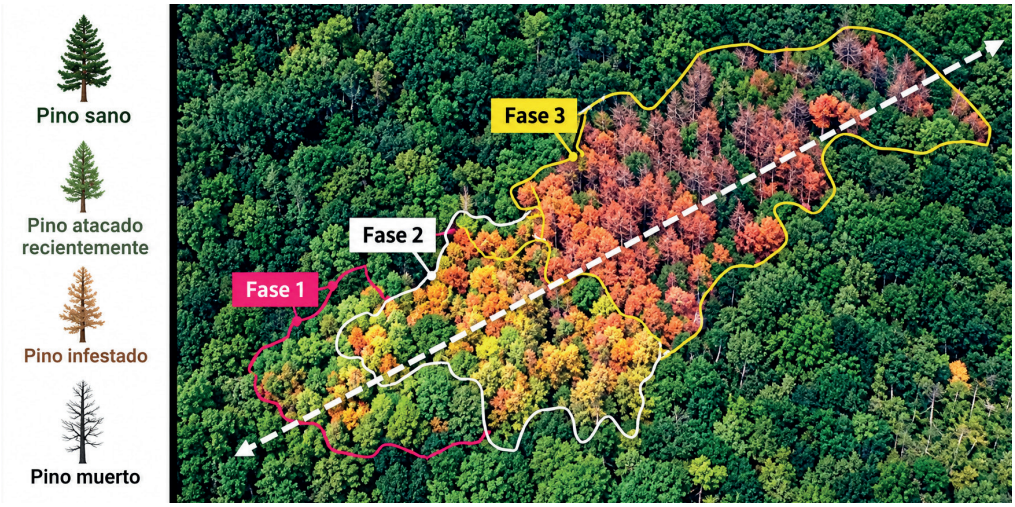
- Mapeo de la eficacia del tratamiento: Mediante nuevas exploraciones de campo georreferenciadas o vuelos de dron posteriores a la aplicación, es posible generar mapas que representen la evolución espacial de la plaga o enfermedad en las áreas intervenidas. Al comparar estos mapas con los mapas iniciales de infestación y con los mapas de aplicación, se puede valorar objetivamente la eficacia del tratamiento en zonas específicas del lote, lo que facilita el ajuste y perfeccionamiento de las estrategias futuras. En este contexto, la AP permite integrar información espacial y temporal para mejorar la toma de decisiones, tal como señalaron Zhang, Wang y Wang

(2002). En este ejemplo, la figura 6 representa diferentes etapas de infestación y mortalidad en pinos, asociadas a plagas como los escarabajos del pino y a la marchitez del pino.

- Trazabilidad y registro: Todos los datos relevantes de la aplicación, como la ubicación geográfica precisa, la fecha y hora de la intervención, la dosis aplicada y el producto fitosanitario utilizado, pueden registrarse con coordenadas GPS/GNSS exactas. Esto permite construir un historial detallado, verificable y auditable de las operaciones desarrolladas en campo.

Esta capacidad de trazabilidad resulta fundamental para la gestión del riesgo, los procesos de certificación y el cumplimiento de normativas ambientales y productivas, en concordancia con lo expuesto por Kamilaris, Kartakoullis y Prenafeta-Boldú (2018), quienes destacaron la importancia del manejo digital de datos en la agricultura moderna. De forma complementaria, Yadav et al. (2024) destacaron que la termografía infrarroja acoplada a plataformas de observación puede emplearse en AP para estimar temperatura del dosel, índice de estrés hídrico del cultivo y variables relacionadas con la evapotranspiración. Por ello, resulta más riguroso presentar estas cámaras como herramientas de alta utilidad en investigación aplicada sobre fisiología vegetal, estrés hídrico, evapotranspiración y monitoreo térmico en ambientes controlados y de campo, en lugar de afirmar su adopción por universidades de países específicos o su implementación reciente en Colombia sin evidencia documental puntual (ver figura 9).

Figura 9. *Mapa de infestación de plaga en bosque de pino*



Fuente: Esta investigación

5. Desafíos y perspectivas futuras

A pesar de los avances significativos alcanzados, la implementación generalizada de los sistemas GPS/GNSS y RTK en el control de plagas y enfermedades todavía enfrenta desafíos técnicos, económicos e institucionales que deben ser considerados para garantizar una adopción efectiva en diferentes escalas productivas.

- Costo inicial: La inversión requerida para adquirir equipos GPS/GNSS/RTK de alta precisión, sensores complementarios y software especializado puede representar una barrera financiera importante para pequeños y medianos productores. Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) señalan que la adopción de tecnologías de AP suele estar condicionada por factores económicos, tamaño de la explotación, capacidad de inversión y percepción del retorno esperado. En consecuencia, aunque estas herramientas ofrecen ventajas claras para el manejo localizado de problemas fitosani-

tarios, su acceso continúa siendo limitado en regiones con menor disponibilidad de capital, crédito rural o servicios tecnológicos.

- Capacitación: La operación, calibración, mantenimiento e interpretación de datos generados por sistemas GPS/GNSS/RTK exigen competencias técnicas específicas. Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018) destacan que el aprovechamiento de tecnologías digitales en agricultura depende no solo de la disponibilidad de equipos, sino también de la capacidad de los usuarios para comprender, procesar e interpretar información compleja. Por ello, resulta indispensable fortalecer programas de formación dirigidos a productores, asistentes técnicos y profesionales del agro, de modo que estas herramientas puedan integrarse correctamente en las prácticas cotidianas de monitoreo, diagnóstico y control fitosanitario.

- Infraestructura de corrección RTK: La precisión centimétrica de los sistemas RTK depende de la disponibilidad de estaciones base, redes de corrección o servicios de comunicación estables. Misra y Enge (2006) explican que el desempeño de los sistemas de posicionamiento satelital está condicionado por la calidad de las señales, los métodos de corrección y las condiciones de operación en campo. En muchas zonas rurales, especialmente en territorios con baja conectividad o topografía compleja, la infraestructura necesaria para sostener correcciones RTK continuas todavía es insuficiente, lo que limita la aplicación efectiva de esta tecnología en labores de control localizado de plagas y enfermedades.

Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, las perspectivas futuras para la integración de GPS/GNSS y RTK en la AP son altamente prometedoras, especialmente por su articulación con nuevas generaciones de sensores, inteligencia artificial, robótica agrícola y plataformas de análisis geoespacial.

- Miniaturización y reducción de costos: El desarrollo tecnológico continuo está favoreciendo la aparición de receptores GPS/

GNSS, módulos RTK, sensores y sistemas de navegación cada vez más compactos, accesibles y funcionales. Zhang y Kovacs (2012) evidencian que la reducción del tamaño y el aumento de la capacidad operativa de las plataformas aéreas no tripuladas han ampliado sus posibilidades de uso en AP. Esta tendencia, combinada con equipos de menor costo y software más intuitivo, puede facilitar que productores de menor escala adopten progresivamente tecnologías de posicionamiento y monitoreo para el manejo fitosanitario.

- Integración con inteligencia artificial y aprendizaje automático: La convergencia entre datos de posicionamiento de alta precisión, imágenes multiespectrales, sensores de campo e inteligencia artificial permitirá mejorar la detección, clasificación y predicción de plagas y enfermedades. Kamilaris y Prenafeta-Boldú (2018) muestran que los enfoques de aprendizaje profundo han ampliado la capacidad de reconocimiento de patrones en imágenes agrícolas, lo que abre la posibilidad de identificar síntomas tempranos, anticipar focos epidémicos y generar recomendaciones automáticas. Esta integración facilitará decisiones más rápidas, localizadas y eficientes, reduciendo aplicaciones innecesarias y optimizando el uso de insumos fitosanitarios.

- Robótica agrícola: El desarrollo de robots agrícolas autónomos equipados con GPS/GNSS/RTK, visión por computadora y sensores avanzados permitirá intervenir plantas individuales o microzonas afectadas dentro del cultivo. Zhang y Kovacs (2012) ya señalaban el potencial de las plataformas no tripuladas para ampliar la observación detallada de los sistemas agrícolas, y esta lógica se extiende hoy hacia robots terrestres capaces de realizar monitoreo, diagnóstico y aplicación localizada. En escenarios productivos complejos, como cultivos intensivos, invernaderos o sistemas agroforestales, esta capacidad de intervención puntual puede

mejorar la eficiencia del control, disminuir el uso de agroquímicos y reducir el impacto ambiental.

Los sistemas GPS/GNSS y RTK constituyen pilares fundamentales de la AP moderna, debido a que ofrecen capacidades de posicionamiento, navegación y georreferenciación que han transformado el manejo de plagas y enfermedades. McBratney, Whelan, Ancev y Bouma (2005) plantean que uno de los desafíos centrales de la AP es convertir la información espacial en decisiones operativas útiles para el manejo sitio-específico. En este sentido, la detección temprana de anomalías, el mapeo preciso de áreas afectadas y la aplicación localizada de tratamientos fitosanitarios permiten incrementar la eficacia de las intervenciones, reducir el desperdicio de agua y agroquímicos, disminuir el impacto ambiental y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Para los futuros profesionales del agro, el conocimiento y dominio operativo de estas tecnologías resulta esencial. La producción agrícola del siglo XXI exige profesionales capaces de interpretar datos georreferenciados, manejar plataformas digitales, evaluar mapas de infestación y diseñar estrategias fitosanitarias basadas en evidencia. Por tanto, el uso de GPS/GNSS y RTK no debe entenderse únicamente como un avance instrumental, sino como una competencia estratégica para enfrentar escenarios de mayor presión productiva, cambio climático, expansión de plagas y necesidad de reducir impactos ambientales.

El Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades, fortalecido por la AP, está reconfigurando la forma de abordar los problemas fitosanitarios en la agricultura contemporánea. Gebbers y Adamchuk (2010) y Zhang, Wang y Wang (2002) coinciden en que la AP permite pasar de decisiones uniformes a intervenciones diferenciadas, sustentadas en información espacial y temporal. Bajo esta lógica, la integración de GPS/GNSS, RTK, sensores remotos, drones, inteligencia artificial y análisis de grandes volúmenes de datos permite transitar de un modelo reactivo y generalizado hacia una gestión fitosanitaria preventiva, localizada y más eficiente.

La identificación temprana de anomalías fisiológicas mediante imágenes multiespectrales e hiperespectrales, cámaras térmicas, sensores de campo y plataformas de análisis permite detectar cambios en vigor, temperatura del dosel, reflectancia o patrones de crecimiento antes de que los síntomas sean visibles a simple vista. Esta capacidad, articulada con la aplicación variable y dirigida de insumos mediante maquinaria o drones, no solo optimiza el uso de recursos y reduce la contaminación ambiental, sino que también fortalece una agricultura más sostenible, resiliente y económicamente viable. Aunque la implementación del MIPE apoyado en AP enfrenta barreras como costos iniciales, conectividad rural limitada y necesidad de capacitación técnica, su potencial transformador es considerable.

El horizonte tecnológico apunta hacia sistemas digitalizados, autónomos e interconectados, capaces de monitorear continuamente las relaciones entre cultivo, clima, plagas, enfermedades y prácticas de manejo. Esta evolución permitirá anticipar ciclos biológicos, estimar riesgos epidémicos y ejecutar intervenciones con mayor precisión espacial y temporal. En esencia, el nuevo paradigma fitosanitario no busca la eliminación total de los organismos dañinos, sino la regulación inteligente de sus poblaciones dentro de umbrales económicamente y ecológicamente aceptables. Esta visión se articula con los principios de una agricultura regenerativa, climáticamente inteligente y orientada a la salud integral del agroecosistema, en concordancia con los planteamientos de Tilman, Cassman, Matson, Naylor y Polasky (2002) sobre sostenibilidad agrícola e intensificación responsable.

Síntesis final

El capítulo 8 permitió comprender que el Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades, cuando se articula con la AP, deja de ser una estrategia basada únicamente en la reacción ante el daño visible y se convierte en un sistema preventivo, localizado y sustentado en información. A lo largo del capítulo se evidenció que las plagas y enfermedades no se distribuyen

de manera uniforme dentro del cultivo, sino que responden a condiciones espaciales y temporales relacionadas con el clima, la humedad, el estado fisiológico de las plantas, la topografía, la densidad del cultivo y las prácticas de manejo. Por esta razón, el uso de tecnologías de precisión permite identificar focos iniciales, delimitar áreas afectadas y orientar intervenciones más oportunas y eficientes.

Uno de los aportes centrales del capítulo fue mostrar que herramientas como drones, sensores remotos, cámaras multiespectrales e hiperespectrales, cámaras térmicas, estaciones agroclimáticas, sistemas GPS/GNSS/RTK, plataformas SIG e inteligencia artificial amplían significativamente la capacidad de observación del agricultor y del profesional del agro. Estas tecnologías permiten detectar anomalías fisiológicas antes de que los síntomas sean evidentes a simple vista, construir mapas de infestación o riesgo, monitorear la evolución de los problemas fitosanitarios y aplicar tratamientos de manera localizada. En consecuencia, el control fitosanitario deja de depender de aplicaciones generalizadas y avanza hacia un modelo de manejo diferenciado, donde cada intervención responde a la condición real del cultivo y no a decisiones homogéneas sobre todo el lote.

El capítulo también destacó que la AP fortalece los principios ecológicos del MIPE, porque favorece el uso racional de agroquímicos, reduce la presión ambiental sobre suelo, agua y biodiversidad, y mejora la eficiencia económica del sistema productivo. La aplicación variable de insumos, el monitoreo georreferenciado y la trazabilidad de las intervenciones permiten disminuir desperdicios, evitar tratamientos innecesarios y evaluar con mayor rigor la eficacia de las medidas implementadas. De esta manera, el manejo fitosanitario se integra con una visión más amplia de sostenibilidad, en la que el objetivo no es eliminar totalmente los organismos presentes en el agroecosistema, sino mantener sus poblaciones dentro de niveles manejables, protegiendo al mismo tiempo la productividad, la salud del cultivo y el equilibrio ecológico.

Sin embargo, el capítulo dejó claro que la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos importantes. Los costos iniciales, la limitada conectividad rural, la necesidad de capacitación técnica, la disponibilidad de infraestructura RTK, la interoperabilidad entre plataformas y la correcta interpretación de los datos siguen siendo barreras que pueden restringir su uso, especialmente en pequeños y medianos productores. Por ello, la implementación del MIPE apoyado en AP no debe entenderse solo como una inversión en equipos, sino como un proceso integral que requiere formación, acompañamiento técnico, adaptación territorial, políticas de acceso y fortalecimiento de capacidades locales.

Finalmente, el capítulo proyectó un horizonte en el que el manejo fitosanitario será cada vez más digital, predictivo y automatizado. La integración entre inteligencia artificial, aprendizaje automático, robótica agrícola, sensores avanzados y sistemas de posicionamiento de alta precisión permitirá anticipar brotes, comprender mejor la dinámica de plagas y enfermedades, y ejecutar intervenciones incluso a nivel de planta individual. En este sentido, el MIPE de precisión representa una transición hacia una agricultura más inteligente, resiliente y ambientalmente responsable, capaz de responder a los desafíos del siglo XXI sin perder de vista que la verdadera finalidad de la tecnología es fortalecer la salud integral del agroecosistema y la sostenibilidad de la producción agrícola.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1: Diseño de un plan de MIPE con AP para un cultivo específico

Contexto: Elijan un cultivo de importancia en su región (por ejemplo, café, aguacate, arroz, palma de aceite).

Consigna: Desarrollen un plan de Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIPE) para ese cultivo, incorporando herramientas y metodologías de AP. El plan debe incluir:

1. **Plagas y enfermedades clave:** Identifiquen al menos tres plagas y tres enfermedades comunes y de alto impacto para el cultivo seleccionado.

2. **Tecnologías de Monitoreo con AP:** Especifiquen qué tecnologías de AP (drones multiespectrales/térmicos, sensores de campo, estaciones meteorológicas, IA, etc.) utilizarían para la detección temprana y el monitoreo continuo de estas amenazas. Justifiquen su elección.

3. **Estrategias de Control Diferenciado:** Describan cómo implementarían la aplicación variable de insumos (biológicos, químicos, culturales) basándose en los datos de AP.

4. **Cálculo de Beneficio/Costo (Estimado):** Realicen una estimación sencilla de los posibles ahorros en insumos y mejoras en el rendimiento o reducción de pérdidas que se podrían lograr con este enfoque, en comparación con un manejo tradicional.

Discusión: ¿Cuáles serían los principales desafíos técnicos y económicos para implementar este plan en una pequeña finca de su región? ¿Cómo se podrían superar?

Ejercicio 2: Análisis de casos de estudio de detección temprana

Contexto: Revisen los ejemplos de detección temprana mencionados en el capítulo (roya del cafeto, monilia/mazorca negra en cacao, mosca blanca/trips en hortalizas).

Tarea:

1. **Profundización en un caso:** Seleccionen uno de los casos de estudio y busquen dos artículos científicos o reportes técnicos adicionales que detallen la aplicación de la AP para la detección temprana de la plaga o enfermedad específica en ese cultivo.

2. **Ventajas y limitaciones:** A partir de la información del capítulo y de su investigación, elaboren una tabla comparativa que muestre las ventajas y limitaciones de la tecnología utilizada para la detección temprana en el caso seleccionado.

3. **Propuesta de mejora:** Sugieran una mejora o una combinación de tecnologías que, a su juicio, podría optimizar aún más la detección temprana en ese escenario.

Discusión: ¿Qué implicaciones tiene la detección temprana para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas? ¿Cómo afecta la rentabilidad del productor?

Ejercicio 3: Debatiendo el rol de los drones en la soberanía alimentaria

Contexto: Los drones están cada vez más presentes en la agricultura.

Tarea: Dividan la clase en dos grupos.

- **Grupo A (Pro-Drones):** Argumenten a favor del uso masivo de drones en la agricultura para el manejo de plagas y enfermedades, destacando sus beneficios en eficiencia, precisión y sostenibilidad.

- **Grupo B (Contra-Drones/Críticos):** Argumenten sobre los desafíos y posibles impactos negativos del uso masivo de drones en la agricultura, como la brecha tecnológica, los costos, la privacidad de los datos, la dependencia tecnológica y la posible afectación a pequeños agricultores.

Discusión: Después del debate, ¿cómo se puede equilibrar el avance tecnológico con la equidad y la sostenibilidad social en el sector agrícola?

Ejercicio 4: Modelado básico de riesgo de enfermedades con datos climáticos.

Contexto: Muchas enfermedades fúngicas son sensibles a las condiciones de temperatura y humedad.

Tarea:

1. Recolección de datos simplificada: Imagine que tiene datos históricos de temperatura (°C) y humedad relativa (%) de una estación meteorológica para un cultivo durante una semana específica en la que se sabe que apareció una enfermedad fúngica. Inventen 7 pares de datos diarios que muestren condiciones favorables (por ejemplo, temperaturas moderadas y alta humedad).

2. Definición de umbrales: Investiguen umbrales generales de temperatura y humedad para el desarrollo de una enfermedad fúngica común (ej. mildiu o tizón tardío).

3. Análisis de riesgo: Utilizando los datos inventados y los umbrales investigados, identifiquen los días en los que las condiciones fueron más favorables para el desarrollo de la enfermedad. Presenten sus hallazgos en una tabla o gráfico sencillo.

4. Propuesta de alerta: Si ustedes fueran un sistema de alerta temprana, ¿en qué día habrían emitido una advertencia a los agricultores y por qué?

Discusión: ¿Qué otros tipos de datos (además de los climáticos) serían importantes para construir modelos de predicción de enfermedades más robustos? ¿Cómo integrarían esos datos?

Ejercicio 5: Ética y privacidad de datos en la AP

Contexto: El uso de sensores y drones genera una gran cantidad de datos sobre las fincas y sus cultivos.

Tarea:

1. Escenario: Un gran consorcio agrícola les propone implementar un sistema de AP avanzado en sus fincas, que recolectaría datos detallados sobre la productividad, el uso de insumos y la salud de los cultivos. A cambio, les ofrecen servicios de asesoría gratuita y acceso a mercados especiales. Sin embargo, los datos serían propiedad del consorcio.

2. Análisis de Pros y Contras: Como pequeños agricultores, identifiquen al menos tres ventajas y tres desventajas de aceptar esta propuesta, centrándose en los aspectos éticos y de privacidad de los datos.

3. Marco Regulatorio Ideal: Si tuvieran la oportunidad de diseñar un marco regulatorio para el uso de datos en la AP en Colombia, ¿qué aspectos clave incluirían para proteger los intereses de los productores y fomentar la transparencia?

Discusión: ¿Cómo pueden los agricultores asegurar que sus datos agrícolas se utilicen de manera justa y beneficiosa para ellos, y no solo para las grandes empresas tecnológicas o agroindustriales?

Referencias

Agisoft LLC. (2025). Agisoft Metashape user manual: Professional edition, version 2.2. Agisoft. https://www.agisoft.com/pdf/metashape_2_2_en.pdf

Anastasiou, E., Fountas, S., Voulgaraki, M., Psiroukis, V., Koutsiaras, M., Kriezi, O., Lazarou, E., Vatsanidou, A., Fu, L., Di Bartolo, F., Barreiro-Hurle, J., & Gómez-Barbero, M. (2023). Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis. Smart Agricultural Technology, 5, Article 100323. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100323

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. Precision Agriculture, 5(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

Bramley, R. G. V. (2005). Understanding variability in winegrape production systems 2. Within-vineyard variation in quality over several vintages. Australian Journal of Grape and Wine Research, 11(1), 33–42. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00277.x

Corwin, D. L. (2013). Site-specific management and delineating management zones. En M. A. Oliver, T. F. A. Bishop, & B. P. Marchant (Eds.), Precision agriculture for sustainability and environmental protection (pp. 135–157). Taylor & Francis Group.

Deleon, L., Brewer, M. J., Esquivel, I. L., & Halcomb, J. (2017). Use of a geographic information system to produce pest monitoring maps for south Texas cotton and sorghum land managers. Crop Protection, 101, 50–57. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.07.016

DJI. (2019, 28 de marzo). DJI introduces DJI Terra to capture, visualize and analyze drone data. https://www.dji.com/media-center/announcements/dji-introduces-dji-terra-to-capture-visualize-and-analyze-drone-data

DJI. (2019, 30 de diciembre). DJI introduces the Zenmuse XT S, a new high frame-rate thermal imaging camera. https://www.dji.com/media-center/announcements/dji-introduces-the-zenmuse-xt-s

DJI. (2026). DJI Terra. https://enterprise.dji.com/dji-terra

DroneDeploy. (2025, 9 de diciembre). Plant health. DroneDeploy Help Center. https://help.dronedeploy.com/hc/en-us/articles/1500004860861-Plant-Health

DroneDeploy. (2026). Agriculture drone mapping software. https://www.dronedeploy.com/solutions/agriculture

FLIR. (2025). Thermal and visual cameras [Imagen]. https://www.flir.com/instruments/utilities/thermal-and-visual-cameras/

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Gerhards, M., Schlerf, M., Mallick, K., & Udelhoven, T. (2019). Challenges and future perspectives of multi-/hyperspectral thermal infrared remote sensing for crop water-stress detection: A review. Remote Sensing, 11(10), Article 1240. https://doi.org/10.3390/rs11101240

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture, 147, 70–90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (Eds.). (2006). Understanding GPS: Principles and applications (2nd ed.). Artech House.

Kogan, M. (1998). Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. Annual Review of Entomology, 43, 243–270. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.243

Kowalczyk, W. Z., & Hadas, T. (2024). A comparative analysis of the performance of various GPS/GNSS positioning concepts dedicated to precision agriculture. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 117, 11–20. https://doi.org/10.2478/rgg-2024-0002

Kumar, H., & Sriram, A. (2024). An overview of drones in agriculture (FS-2024-0705). University of Maryland Extension.

Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. Agronomy Journal, 111(4), 1552–1569. https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779

Lowenberg-DeBoer, J., & Swinton, S. M. (1997). Economics of site-specific management in agronomic crops. En F. J. Pierce & E. J. Sadler (Eds.), The state of site-specific management for agriculture (pp. 369–396). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Manickathan, L., Defraeye, T., Carl, S., Richter, H., Allegrini, J., Derome, D., & Carmeliet, J. (2022). A study on diurnal microclimate hysteresis and plant morphology of a Buxus sempervirens using PIV, infrared thermography, and X-ray imaging. Agricultural and Forest Meteorology, 313, Article 108722. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108722

McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. Precision Agriculture, 6, 7–23. https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8

Misra, P., & Enge, P. (2011). Global positioning system: Signals, measurements, and performance (Rev. 2nd ed.). Ganga-Jamuna Press.

Mohan, M., Richardson, G., Gopan, G., Aghai, M. M., Bajaj, S., Galgamuwa, G. A. P., Vastaranta, M., Pitumpe Arachchige, P. S., Amorós, L., Dalla Corte, A. P., & Cardil, A. (2021). UAV-supported forest regeneration: Current trends, challenges and implications. Remote Sensing, 13(13), Article 2596. https://doi.org/10.3390/rs13132596

Motalab, M. B., & Al-Mallahi, A. (2024). Development of a flexible electronic control unit for seamless integration of machine vision to CAN-enabled boom sprayers for spot application technology. Smart Agricultural Technology, 9, Article 100618. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100618

Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Optris GmbH. (2025). Optris PI 640i: Technical data [Data sheet]. https://optris.com/wp-content/uploads/2025/07/PI-640i-DS-EN2025-07-A_web.pdf

Pappalardo, S., Consoli, S., Longo-Minnolo, G., Vanella, D., Longo, D., Guarrera, S., D'Emilio, A., & Ramírez-Cuesta, J. M. (2023). Performance evaluation of a low-cost thermal camera for citrus water status estimation. Agricultural Water Management, 288, Article 108489. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108489

Parihar, G., Saha, S., & Giri, L. I. (2021). Application of infrared thermography for irrigation scheduling of horticulture plants. Smart Agricultural Technology, 1, Article 100021. https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100021

PIX4D. (2026). PIX4Dfields: Drone software for agriculture mapping. https://www.pix4d.com/product/pix4dfields

Qiu, W., Watkins, G. A., Sobolik, C. J., & Shearer, S. A. (1998). A feasibility study of direct injection for variable-rate herbicide application. Transactions of the ASAE, 41(2), 291–299. https://doi.org/10.13031/2013.17174

Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global Navigation Satellite Systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the Web of Science. Agriculture, 13(7), Article 1417. https://doi.org/10.3390/agriculture13071417

Rejeb, A., Abdollahi, A., Rejeb, K., & Treiblmaier, H. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 198, Article 107017. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017

Seek Thermal. (2025). CompactPRO. https://www.thermal.com/compact-series-cameras.html

Shahi, T. B., Xu, C.-Y., Ahmad, W., Arnous, K., Noman, M., & Wang, F. (2023). Recent advances in crop disease detection using UAV and deep learning techniques. Remote Sensing, 15(9), Article 2450. https://doi.org/10.3390/rs15092450

Shoaib, M., Ahsan, M., Ahmed, A., Khan, F., Ullah, S., Khan, M. R., & Ali, A. (2025). Plant stress detection using multimodal imaging and machine learning: From leaf spectra to smartphone applications. Frontiers in Plant Science, 16, Article 1670593. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1670593

SymAgri. (2024). Trimble RTK base station [Fotografía de producto].

Teledyne FLIR. (2025). FLIR ONE Pro thermal imaging camera for smartphones. https://www.flir.com/products/flir-one-pro/

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, 418(6898), 671–677. https://doi.org/10.1038/nature01014

Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. Information, 10(11), Article 349. https://doi.org/10.3390/info10110349

Velazquez-Chavez, L. J., Daccache, A., Mohamed, A. Z., & Centritto, M. (2024). Plant-based and remote sensing for water status monitoring of orchard crops: Systematic review and meta-analysis. Agricultural Water Management, 304, Article 109051. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109051

Wang, Y., Peng, D., Shen, M., Xu, X., Yang, X., Huang, W., Yu, L., Liu, L., Li, C., Li, X., Zheng, S., & Zhang, H. (2020). Contrasting effects of temperature and precipitation on vegetation greenness along elevation gradients of

the Tibetan Plateau. Remote Sensing, 12(17), Article 2751. https://doi.org/10.3390/rs12172751

Yadav, M., Vashisht, B. B., Vullaganti, N., Kumar, P., Jalota, S. K., Kumar, A., & Kaushik, P. (2024). UAV-enabled approaches for irrigation scheduling and water body characterization. Agricultural Water Management, 304, Article 109091. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109091

Zarco-Tejada, P. J., Camino, C., Beck, P. S. A., Calderón, R., Hornero, A., Hernández-Clemente, R., Kattenborn, T., Montes-Borrego, M., Susca, L., Morelli, M., Gonzalez-Dugo, V., North, P. R. J., Landa, B. B., & Navas-Cortés, J. A. (2018). Previsual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations. Nature Plants, 4, 432–439. https://doi.org/10.1038/s41477-018-0189-7

Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. J. (2018). Recent advances and applications of remote sensing in plant disease detection. Remote Sensing, 10(6), Article 896. https://doi.org/10.3390/rs10060896

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precision Agriculture, 13, 693–712. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2–3), 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

Zhang, S., Wang, X., Lin, H., Dong, Y., & Qiang, Z. (2025). A review of the application of UAV multispectral remote sensing technology in precision agriculture. Smart Agricultural Technology, 12, Article 101406. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101406

Conclusión general

La AP representa una de las transformaciones más importantes del sector agropecuario contemporáneo, no solo por la incorporación de tecnologías digitales, sino porque propone una nueva forma de comprender, observar y manejar los sistemas productivos. A lo largo de este libro se ha evidenciado que el campo no puede seguir siendo tratado como una unidad homogénea, ya que dentro de una misma finca existen diferencias en suelo, clima, topografía, humedad, fertilidad, vigor del cultivo, presión de plagas, enfermedades y productividad. Reconocer esa variabilidad es el primer paso para tomar decisiones más eficientes, sostenibles y ajustadas a la realidad de cada territorio.

El recorrido desarrollado en los diferentes capítulos permitió comprender que la AP no inicia con la compra de sensores, drones, estaciones meteorológicas o programas informáticos, sino con una evaluación rigurosa del terreno y del cultivo. La caracterización física, química y biológica del suelo, el análisis climático, la lectura de la topografía y la identificación de zonas homogéneas de manejo constituyen la base técnica para cualquier intervención precisa. Sin esta etapa diagnóstica, la tecnología pierde sentido, porque los datos solo son útiles cuando responden a una pregunta agronómica clara y cuando pueden transformarse en decisiones concretas.

En este sentido, las herramientas tecnológicas presentadas en el libro GPS/GNSS, sensores remotos y proximales, drones, plataformas SIG, imágenes satelitales, estaciones agroclimáticas, IoT, Big Data e inteligencia artificial deben entenderse como medios para fortalecer el criterio técnico, no como sustitutos del conocimiento agronómico. Su verdadero valor está en permitir una observación más detallada del sistema productivo, detectar problemas antes de que sean visibles, anticipar riesgos, reducir desperdicios y orientar prácticas diferenciadas de manejo. La precisión, por tanto, no consiste únicamente en medir más, sino en interpretar mejor.

Uno de los aportes centrales de la AP es su capacidad para mejorar el uso de los recursos. La fertilización variable, el riego inteligente, la aplicación

localizada de insumos y el monitoreo continuo del cultivo permiten reducir pérdidas de agua, nutrientes y agroquímicos, al tiempo que favorecen la productividad y la rentabilidad. En un contexto marcado por el cambio climático, la degradación de los suelos, la presión sobre el recurso hídrico y la necesidad de producir alimentos de manera más responsable, estas herramientas ofrecen una ruta viable para avanzar hacia sistemas agrícolas más eficientes y resilientes.

El libro también muestra que la AP tiene una aplicación directa en los sistemas agrícolas, agroforestales y ambientales. Su integración con arreglos diversificados, como cultivos bajo sombra, sistemas agroforestales con cacao, café, frutales o sistemas silvopastoriles, permite fortalecer el manejo de la heterogeneidad propia de estos paisajes productivos. En estos contextos, la AP no debe ser entendida como una tecnología exclusiva de grandes explotaciones mecanizadas, sino como un enfoque adaptable, que puede ajustarse a diferentes escalas, niveles de inversión y condiciones territoriales.

Sin embargo, la adopción de la AP enfrenta retos importantes. Los costos iniciales, la falta de conectividad rural, la limitada formación técnica, la baja interoperabilidad entre plataformas, la dependencia de proveedores tecnológicos y las dudas sobre la propiedad y el uso de los datos agrícolas son barreras que no pueden ignorarse. Por ello, el futuro de la AP no dependerá únicamente del avance tecnológico, sino de la capacidad de construir modelos de acceso más inclusivos, fortalecer la extensión agropecuaria, promover tecnologías de bajo costo, impulsar la capacitación de productores y técnicos, y garantizar una gobernanza clara de la información.

Desde una perspectiva educativa, este libro busca que el lector no vea la AP como una moda tecnológica, sino como una metodología de análisis y gestión del agro. El profesional del sector agropecuario, agroforestal o ambiental debe ser capaz de leer mapas, interpretar sensores, analizar datos, reconocer limitaciones de campo y dialogar con los productores para convertir la información en acciones pertinentes. La tecnología solo genera

transformación cuando se articula con conocimiento local, experiencia productiva, acompañamiento técnico y sentido territorial.

En consecuencia, la AP debe avanzar hacia una visión más humana, ambiental y estratégica. Su finalidad no es producir más a cualquier costo, sino producir mejor: con mayor eficiencia, menor impacto ambiental, mejor uso de los recursos, mayor rentabilidad y mayor capacidad de adaptación frente a la incertidumbre climática y económica. En este punto, la precisión se convierte en una herramienta para cuidar el suelo, proteger el agua, reducir riesgos, mejorar la calidad de los cultivos y fortalecer los medios de vida rurales.

Como conclusión general, puede afirmarse que la AP es una oportunidad para reconciliar productividad, sostenibilidad e innovación. Su implementación exige datos confiables, tecnologías apropiadas, análisis técnico, formación permanente y decisiones contextualizadas. Cuando estos elementos se integran adecuadamente, la AP deja de ser un conjunto de equipos sofisticados y se convierte en una estrategia de gestión inteligente del territorio. Así, el campo del futuro no será únicamente más digital, sino también más consciente, más eficiente, más resiliente y más conectado con las necesidades reales de quienes producen y cuidan la tierra.

Acerca de los autores

Diego Javier Pérez Ortega Ph.D

Posdoctorado en Ciencias Ambientales con énfasis en Agricultura de Precisión – Universidad Estadual Paulista - UNESP, Sorocaba, Brasil. Doctor en Ciencias Ambientales – UNESP, Sorocaba, Brasil. Magíster en Ingeniería Civil, área de recursos hídricos y tecnologías ambientales – UNESP, Ilha Solteira, Brasil. Ingeniero Agroforestal de la Universidad de Nariño. Profesor-Investigador en la Universidad de Nariño, Colombia – Pasto

Jesús Geovanny Solarte Guerrero Ph.D

Doctor en Ciencias Agrarias de la Universidad de Nariño, Magister en Ingeniería Ambiental de la Universidad Mariana. Ingeniero Agroforestal de la Universidad de Nariño. Profesor-Investigador en la Universidad de Nariño, Colombia – Pasto.

Álvaro Javier Ceballos Freire Ph.D

Doctor en Ciencias Agrarias de la Universidad de Nariño. Especialista en producción, transformación y comercialización de la madera en la Universidad del Tolima. Magister en Desarrollo regional y planificación del territorio Universidad Autónoma de Manizales. Ingeniero Agroforestal. Ingeniero Agroforestal de la Universidad de Nariño. Profesor-Investigador en la Universidad de Nariño, Colombia – Pasto.

José Julián Apraez Muñoz Ph.D

Doctor en genética y biología Molecular de la Universidad Estadual de Santa Cruz, Brasil. Magister en ciencias agrarias en la Universidad de Nariño, Ingeniero agrónomo de la Universidad de Nariño. Profesor-Investigador en la Universidad de Nariño, Colombia – Pasto.

Carlos Arturo Betancourth García Ph.D

Doctor en Ciencias Agrarias de la universidad nacional de Colombia sede Palmira. Maestría en Fitopatología en la universidad de caldas, Ingeniero agrónomo de la Universidad de Nariño. Profesor-Investigador en la Universidad de Nariño, Colombia – Pasto.

êditorial
Universidad de **Nariño**

Año de publicación: 2026
San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

Fundamentos y aplicaciones de la agricultura de precisión. Tomo I es una obra oportuna, actual y necesaria para comprender la transformación tecnológica que vive el sector agropecuario en el siglo XXI. El libro presenta la agricultura de precisión no solo como un conjunto de herramientas digitales, sino como una nueva forma de observar, interpretar y manejar el territorio productivo a partir de datos, conocimiento agronómico y responsabilidad ambiental.

A lo largo de sus capítulos, la obra conduce al lector por un recorrido formativo que inicia con los principios conceptuales de la agricultura de precisión y avanza hacia su aplicación práctica en la evaluación del cultivo y el terreno, el uso de herramientas tecnológicas, el muestreo georreferenciado del suelo, el monitoreo mediante sensores, el análisis de datos, la fertilización de tasa variable y el manejo integrado de plagas y enfermedades. Esta estructura convierte el libro en una guía integral para estudiantes, docentes, investigadores, extensionistas, productores y profesionales vinculados a las ciencias agrarias, ambientales y agroforestales.

Uno de los mayores aportes de esta obra es su capacidad para conectar la innovación tecnológica con la realidad de los sistemas productivos latinoamericanos. Lejos de presentar la agricultura de precisión como una solución exclusiva para grandes explotaciones tecnificadas, el texto reconoce los desafíos de conectividad, costos, formación técnica y apropiación social que enfrentan los territorios rurales. Por ello, propone una mirada crítica, territorial y aplicada, donde sensores, drones, sistemas de información geográfica, inteligencia artificial, Internet de las Cosas y análisis de datos se convierten en medios para tomar mejores decisiones, no en fines aislados.

El libro también destaca por su enfoque agroecológico y agroforestal, al insistir en que producir con precisión no significa únicamente aumentar rendimientos, sino hacerlo con menor impacto, mayor eficiencia en el uso de recursos y mayor respeto por la biodiversidad, el suelo, el agua y los saberes locales. En ese sentido, la obra invita a superar el manejo uniforme de los cultivos y a reconocer que cada lote, cada finca y cada agroecosistema posee variaciones espaciales y temporales que deben ser interpretadas antes de intervenir.

En conjunto, Fundamentos y aplicaciones de la agricultura de precisión. Tomo I constituye una contribución valiosa para la formación de una nueva generación de profesionales del agro: más analíticos, más sensibles al territorio y más preparados para transformar datos en decisiones sostenibles. Es un libro que enseña, orienta e inspira a repensar la agricultura desde la ciencia, la tecnología y el compromiso ético con la vida rural y el ambiente.

ISBN: 978-628-7933-16-3
9 786287 933163
ISBN: 978-628-7933-17-0
9 786287 933170

Universidad de Nariño
FUNDADA EN 1904

Universidad de Nariño
ACREDITADA EN ALTA CALIDAD
RESOLUCIÓN MEN 000022 - ENERO 11 DE 2023

êditorial
Universidad de Nariño