FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Aplicaciones avanzadas, inteligencia artificial y gestión estratégica del agro

VOLUMEN II



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

Aplicaciones avanzadas, inteligencia artificial y gestión estratégica del agro

VOLUMEN II

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Aplicaciones avanzadas, inteligencia artificial y gestión estratégica del agro

VOLUMEN II

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 : aplicaciones avanzadas, inteligencia artificial y gestión estratégica del agro / Diego Javier Pérez Ortega … [y otros]—1ª. Ed.-- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2026

V. 2 : ilustraciones, fotografías, gráficas, tablas

Contenido : Optimización del riego con agricultura de precisión. Monitoreo de rendimiento. Integración de Inteligencia artificial y Big data. Aspectos económicos y retorno de inversión. Educación y formación en agricultura de precisión.

Incluye Referencias bibliográficas al final de cada capítulo y reseña de los autores
p. 397 - 398

ISBN: 978-628-7933-18-7 Digital – Vol. II
ISBN: 978-628-7933-16-3 Digital – Obra completa

1. Agricultura de precisión 2. Agricultura—Tecnologías digitales 3. Agricultura de precisión—Inteligencia artificial, Big data 4. Aspectos económicos—Agricultura de precisión 5. Agricultura de precisión—Educación y formación 6. Evaluación de casos. 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

SECCIÓN DE BIBLIOTECA

Volumen II
Fundamentos y aplicaciones de la agricultura de precisión: Aplicaciones avanzadas, inteligencia artificial y gestión estratégica del agro

© 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): 978-628-7933-18-7
DOI: https://doi.org/10.22267/lib.udn.085
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

11	**CAPÍTULO 1** Optimización del riego con agricultura de precisión
78	**CAPÍTULO 2** Monitoreo del rendimiento y evaluación de resultados
152	**CAPÍTULO 3** Integración de inteligencia artificial y big data
215	**CAPÍTULO 4** Aspectos económicos y retorno de inversión de la agricultura de precisión - AP
247	**CAPÍTULO 5** Educación y formación en agricultura de precisión: desafíos y oportunidades
301	Casos de éxito
383	Acerca de los autores

Presentación

Si en el primer tomo nos adentramos en los fundamentos de la agricultura de precisión (AP), entendida como una nueva manera de observar y manejar el campo con sensatez tecnológica y conciencia ecológica, este segundo tomo representa el salto hacia el horizonte de lo posible: la integración avanzada de herramientas como la inteligencia artificial - IA, el Big data, la robótica y los sistemas inteligentes de riego, ahora al servicio de una agricultura más estratégica, climáticamente resiliente y socialmente justa.

Hoy más que nunca, el agro se enfrenta a interrogantes que desafían las respuestas del pasado: ¿cómo prever eventos extremos cuando el clima ha perdido su lógica, o cómo decidir cuándo sembrar y nutrir los suelos ante ciclos naturales desdibujados? Como respuesta a estos desafíos, este libro se propone integrar herramientas complejas pero humanas como la agricultura de precisión, el Big data y la inteligencia artificial para transformar la incertidumbre en decisiones informadas, sitio-específicas y socialmente contextualizadas. A través de sus páginas, el propósito es guiar al lector en la optimización del riego y el uso de recursos mediante sensores y algoritmos que complementan la visión humana, demostrando que la tecnología no es un fin en sí mismo, sino una aliada para la sostenibilidad.

Finalmente, cerramos con algo aún más poderoso que los sensores o los drones: la evidencia viva. Casos de éxito, desde parcelas andinas hasta sistemas agroforestales amazónicos, que muestran que sí es posible. Que la AP puede ser inclusiva, que puede adaptarse a las laderas, a los suelos frágiles, a las fincas con escaso acceso tecnológico. Que lo importante no es cuán avanzada sea la herramienta, sino cuán útil y pertinente sea para quien la utiliza.

Este segundo tomo se constituye no como un destino final ni como una cumbre aislada del conocimiento, sino como un puente estratégico y necesario que conecta la teoría académica con la praxis agronómica, vinculando la ciencia de datos con la realidad física del terreno y la simulación satelital con la sabiduría ancestral de la población local. En este espacio de convergencia, las líneas de código de programación dialogan directamente con los surcos del campo para ofrecer una visión integral de la Inteligencia artificial (IA), definida en este contexto como la disciplina científica que desarrolla sistemas computacionales capaces de emular funciones cognitivas humanas como el aprendizaje, el razonamiento y la percepción mediante algoritmos de *Machine Learning* y redes neuronales. Estos sistemas permiten procesar volúmenes masivos de datos geoespaciales y climáticos para identificar patrones imperceptibles, predecir escenarios de estrés hídrico y optimizar la aplicación de insumos con una precisión que trasciende las limitaciones de la observación humana tradicional.

No obstante, el propósito fundamental de esta obra para todos los vinculados a las ciencias agrarias va más allá de la simple implementación técnica de herramientas digitales; busca que el futuro profesional encuentre rutas metodológicas para cultivar con eficiencia productiva, pero también para desarrollar un pensamiento crítico sobre una inteligencia que debe ser, ante todo, ética, comunitaria y arraigada al territorio.

El libro propone que la IA no debe desplazar al criterio agronómico, sino potenciarlo mediante la conversión de datos crudos en información accionable para la sostenibilidad. Si el primer volumen de esta serie tuvo como objetivo ayudarnos a observar y diagnosticar el entorno rural, este segundo tramo del viaje nos invita formalmente a la toma de decisiones informadas, guiando a la agricultura del siglo XXI hacia un modelo de gestión donde la precisión técnica, el rigor científico de los algoritmos y el sentido humano de responsabilidad social se encuentran en un mismo punto de decisión estratégica para el bienestar del agro.

Introducción

El siglo XXI nos ha lanzado un reto que parece sacado de una narrativa de ciencia ficción, pero cuyas consecuencias son palpables en cada hectárea: ¿cómo alimentar a una población en expansión sin devorarnos los ecosistemas que nos mantienen vivos? Esta pregunta deja de ser una abstracción académica cuando el barro se pega a las botas y un productor ve cómo una sequía imprevista, una plaga "invisible" o la volatilidad de los mercados globales amenazan el esfuerzo de meses. Ante este panorama de incertidumbre climática y económica, la Agricultura de precisión (AP) no surge simplemente como una caja de herramientas tecnológicas, sino como un cambio de "chip" mental y un nuevo paradigma de acción. Si el primer tomo de esta obra nos enseñó a observar la variabilidad del campo con nuevos ojos, este segundo volumen es una invitación formal a tomar el volante del sistema productivo mediante el conocimiento aplicado.

En este tramo del viaje, saltamos de los cimientos conceptuales al nivel superior de la gestión agronómica: un universo donde la Inteligencia artificial (IA) se convierte en la gran aliada estratégica. Aquí, la IA no es un ente abstracto, sino un conjunto de algoritmos de *Machine Learning* y modelos predictivos capaces de procesar patrones complejos que el ojo humano, por naturaleza, ignora. Al integrar esta inteligencia con el Big data ese flujo masivo de datos provenientes de satélites, drones y estaciones meteorológicas logramos transformar gigabytes de información cruda en "sabiduría agronómica" accionable en tiempo real. Ya no se trata de promediar el lote, sino de entender que cada metro cuadrado tiene una voz propia que la tecnología nos permite escuchar para optimizar la nutrición y la protección de los cultivos.

Bajo esta lente, el agro se revela como un sistema dinámico de flujos constantes: de agua, energía, nutrientes e información. Un eje central de

esta entrega es el Riego de Precisión, donde dejamos atrás la intuición para dar paso a la gestión científica. Mediante sensores de humedad de última generación, imágenes térmicas y sistemas de aplicación de tasa variable - VTR, garantizamos que cada gota de agua llegue al lugar exacto en el momento preciso, adaptándonos con rigor técnico a la diversidad de nuestros paisajes, desde los valles interandinos hasta las llanuras tropicales. Sin embargo, no nos dejamos deslumbrar por el brillo de los cables. Sabemos que un algoritmo para predecir rendimientos o diagnosticar el pH del suelo es papel mojado si no existe una cultura digital sólida y un proceso de formación humana que cierre la brecha tecnológica en nuestros territorios rurales.

La tecnología sin educación es, a menudo, un adorno costoso e ineficiente. Por ello, reivindicamos la necesidad de nuevos perfiles profesionales interdisciplinarios que sepan dialogar con la misma fluidez tanto con una línea de código como con una comunidad de pequeños productores.

El libro aterriza esta visión con historias de éxito reales en Colombia y Latinoamérica: desde asociaciones cacaoteras que mejoran su calidad mediante sensores, hasta mujeres rurales que lideran la planificación de cultivos diversificados usando plataformas digitales. Estos casos demuestran que la AP puede ser contextualizada, inclusiva y profundamente respetuosa del saber local. Al cerrar estas páginas, nuestro objetivo no es que el lector posea todas las respuestas, sino que desarrolle una mirada crítica sobre la ética y la equidad en el agro.

Te invitamos, pues, a sembrar datos con el mismo respeto con el que se siembra una semilla, entendiendo que, en la agricultura del futuro, la tecnología no reemplaza al ser humano, sino que potencia su capacidad de cuidar la tierra.

Capítulo 1

Optimización del riego con agricultura de precisión



Objetivos de aprendizaje

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

1. Analizar integralmente la dinámica del sistema suelo–planta–atmósfera (SPA) como base conceptual para la programación eficiente del riego en diferentes condiciones agroclimáticas.

2. Interpretar y correlacionar datos provenientes de sensores de humedad del suelo, imágenes térmicas y estaciones meteorológicas, con el fin de apoyar la toma de decisiones en tiempo real.

3. Diseñar estrategias de riego de precisión fundamentadas en la variabilidad espacial y temporal del cultivo, utilizando herramientas de análisis geoespacial y zonificación productiva.

4. Evaluar el impacto fisiológico del estrés hídrico sobre los cultivos, considerando indicadores ecofisiológicos, respuestas metabólicas y efectos sobre el rendimiento.

5. Integrar tecnologías de riego de tasa variable (V) en sistemas productivos, articulando criterios agronómicos, hidráulicos y económicos.

6. Valorar el impacto ambiental y económico del riego optimizado, mediante indicadores de eficiencia hídrica, productividad del agua y sostenibilidad del sistema productivo.

Conceptos clave

- Evapotranspiración (ET): Proceso combinado mediante el cual el agua se transfiere desde la superficie terrestre hacia la atmósfera por dos mecanismos simultáneos: **evaporación** (desde el suelo y superficies húmedas) y **transpiración** (a través de los estomas de las plantas).

- ET_0 – Evapotranspiración de referencia: Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia hipotética (generalmente pasto uniforme, bien regado y sin estrés). Se calcula comúnmente mediante la ecuación FAO Penman-Monteith y representa la **demanda atmosférica de agua**, independiente del cultivo.

- ETc – Evapotranspiración del cultivo: Es la evapotranspiración real de un cultivo específico en condiciones estándar. Se calcula como: $ETc=ETO \times Kc$ donde Kc es el coeficiente de cultivo.

- Coeficiente de cultivo (Kc): Factor adimensional que ajusta la ET_0 a las condiciones específicas de un cultivo, considerando su especie, estado fenológico, arquitectura foliar y cobertura del suelo. Varía durante el ciclo productivo (inicial, desarrollo, media estación y maduración).

- Sistema suelo–planta–atmósfera (SPA: Modelo conceptual que describe la interacción dinámica entre:

  - El **suelo** (reservorio y medio de transporte del agua),

  - La **planta** (sistema conductor y regulador vía estomas),

  - La **atmósfera** (motor evaporativo).

Este sistema regula el flujo continuo de agua impulsado por gradientes de potencial hídrico.

- Estrés hídrico: Condición fisiológica que ocurre cuando la disponibilidad de agua en el suelo es insuficiente para satisfacer la demanda evaporativa del cultivo, generando:
  - Cierre estomático
  - Reducción fotosintética
  - Disminución del crecimiento y rendimiento

Puede ser leve, moderado o severo.

- Sensores de humedad del suelo: Dispositivos electrónicos que miden el contenido volumétrico de agua en el suelo o su potencial matricial. Permiten monitoreo en tiempo real para optimizar la programación del riego.
- Tensiometría: Método de medición del **potencial matricial del agua en el suelo**, basado en la tensión con la que el agua está retenida en los poros del suelo. Se expresa comúnmente en centibares (cb) o kilopascales (kPa). Es especialmente útil en suelos de textura media a fina.
- Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR): Técnica que mide el contenido volumétrico de agua del suelo mediante la propagación de pulsos electromagnéticos a través de sondas metálicas. La velocidad del pulso depende de la constante dieléctrica del suelo, altamente influenciada por el agua.
- Imágenes térmicas: Imágenes captadas por sensores infrarrojos que registran la temperatura superficial del dosel vegetal. Son utilizadas para detectar estrés hídrico, ya que las plantas con déficit de agua presentan mayor temperatura foliar debido al cierre estomático.

- NDWI (Normalized Difference Water Index): Índice espectral derivado de sensores remotos que permite estimar el contenido de agua en la vegetación. Se calcula usando bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR):

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Valores altos indican mayor contenido hídrico en la vegetación.

- Riego de tasa variable (VRI – Variable Rate Irrigation): Tecnología que permite aplicar diferentes láminas de riego dentro de un mismo lote, en función de la variabilidad espacial del suelo, topografía, textura o estado del cultivo. Se basa en mapas de prescripción generados con sistemas de inforamción geográfica - SIG y sensores.

- Balance hídrico: Modelo cuantitativo que describe las entradas y salidas de agua en el sistema suelo–cultivo durante un periodo determinado:

  Entradas:

  - Precipitación
  - Riego

Salidas:

  - Evapotranspiración
  - Escorrentía
  - Percolación profunda

Permite determinar déficit o exceso hídrico.

- Eficiencia en uso del agua (EUA): Indicador que expresa la relación entre la producción obtenida (biomasa o rendimiento) y el volumen de agua consumida por el cultivo:

$$EUA = \frac{\textbf{Rendimiento}}{Agua\ Consumida}$$

Se expresa en kg/m³ o similares.

- Lixiviación: Proceso de desplazamiento descendente de agua y solutos (nutrientes o sales) más allá de la zona radicular debido a exceso de riego o lluvia intensa. Puede provocar pérdidas de fertilizantes y contaminación de aguas subterráneas.

- Salinización: Acumulación progresiva de sales solubles en el perfil del suelo, generalmente asociada a:

  - Riego con aguas salinas
  - Drenaje deficiente
  - Alta evaporación

Reduce la disponibilidad de agua para las plantas por efecto osmótico.

Desarrollo técnico

Fundamentación del riego con agricultura de precisión

El agua se erige como el recurso de mayor criticidad para la producción agrícola global, y su disponibilidad, junto con una gestión técnica eficiente, son factores determinantes para asegurar la sostenibilidad y la rentabilidad intrínseca del sector agropecuario (Jiménez, et al., 2023). En un escenario contemporáneo, caracterizado por una creciente escasez hídrica estructural, una acentuada variabilidad climática y una demanda alimentaria en constante ascenso demográfico, la agricultura se confronta con el imperativo estratégico

de producir un mayor volumen de biomasa con una menor cantidad de recursos. Por consiguiente, la adopción de prácticas de riego optimizadas no representa meramente una opción discrecional para el productor moderno, sino que se manifiesta como una necesidad ineludible para salvaguardar la seguridad alimentaria a nivel global y la viabilidad financiera a largo plazo de las unidades productivas (Universidad Agrícola, 2018).

Históricamente, la programación del riego se ha fundamentado en metodologías empíricas, observaciones visuales o calendarios preestablecidos que ignoran la dinámica real del sistema suelo-planta-atmósfera. Esta falta de precisión ha derivado frecuentemente en un uso ineficiente del recurso hídrico, manifestándose en aplicaciones excesivas que provocan fenómenos indeseables como la lixiviación de nutrientes esenciales hacia mantos freáticos, el desarrollo de patógenos radiculares por condiciones de anoxia y la salinización progresiva de los perfiles del suelo. Por el contrario, un suministro insuficiente somete a los cultivos a un estrés hídrico prolongado que cierra los estomas, reduce la tasa fotosintética y afecta negativamente la calidad organoléptica del producto final. Ambos extremos no solo acarrean pérdidas económicas directas y significativas, sino que exacerban el impacto ambiental negativo al desequilibrar los ecosistemas circundantes.

Bajo este panorama de desafíos multifacéticos, la Agricultura de precisión (AP) emerge como una solución tecnológica y administrativa transformadora. Al integrar herramientas avanzadas como sensores de humedad de suelo, teledetección mediante índices de vegetación y sistemas de aplicación variable, la AP permite a los profesionales del agro tomar decisiones basadas en datos en tiempo real. Este enfoque sistémico no solo maximiza la eficiencia en el uso del agua (EUA), sino que también optimiza de forma sinérgica la utilización de energía y fertilizantes, reduciendo drásticamente la huella de carbono de la producción. En última instancia, este capítulo se dedicará a diseccionar cómo la optimización del riego mediante la AP redefine el futuro agronómico, analizando las tecnologías de vanguardia y las estrategias de programación que garantizan un incremento tangible en el rendimiento y la estabilidad de las fincas.

1. Tecnologías para el manejo del agua

La agricultura de precisión (AP) ha revolucionado la gestión del agua al incorporar un ecosistema de tecnologías innovadoras que permiten un monitoreo y control del recurso hídrico con una resolución espacial y temporal sin precedentes. Estas herramientas no han surgido de forma aislada; son el resultado de décadas de investigación interdisciplinaria donde convergen la agronomía, la ingeniería agrícola, la electrónica de estado sólido, las ciencias de la computación y la teledetección multiespectral. Esta sinergia de conocimientos permite transformar variables biofísicas complejas en flujos de datos precisos y en tiempo real, facilitando una interpretación más profunda de la dinámica hídrica en la interfaz suelo-planta.

1.1 Sensores de humedad del suelo

Los sensores de humedad del suelo se han consolidado como dispositivos esenciales en la agricultura moderna, permitiendo cuantificar con rigor científico la fracción de agua disponible para las plantas a diversas profundidades del perfil edáfico. El desarrollo de esta instrumentación ha experimentado una evolución notable, transitando desde los rudimentarios métodos gravimétricos basados en el pesaje y secado de muestras en estufa hasta tecnologías electrónicas de estado sólido altamente sofisticadas, caracterizadas por su bajo consumo energético y su capacidad de integración con redes inalámbricas (Jiménez et al., 2023). La selección del sensor idóneo no es una decisión trivial, pues debe fundamentarse en una evaluación técnica de factores críticos como la precisión requerida para el cultivo, las propiedades granulométricas y la densidad aparente del suelo, la resistencia del hardware a la degradación química en condiciones de campo y, fundamentalmente, la viabilidad económica de la inversión dentro de la estructura de costos de la unidad productiva.

En el mercado tecnológico actual, destacan diversas metodologías de medición, entre las que sobresalen los sensores capacitivos, los tensiómetros de vacío y los sistemas basados en la constante dieléctrica

del suelo, tales como la reflectometría de dominio de tiempo (TDR) y la reflectometría de dominio de frecuencia (FDR). Estos dispositivos, instalados estratégicamente en la zona radicular activa, transmiten flujos de datos continuos que permiten determinar con exactitud los umbrales de riego, optimizando los intervalos de aplicación para mantener el contenido de agua entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Este control preciso tiene como objetivo primordial mitigar tanto el estrés hídrico por déficit como el anegamiento por exceso; condiciones que alteran la respiración celular, limitan la arquitectura radicular y merman drásticamente el potencial genético de rendimiento del cultivo.

La arquitectura de estos sistemas se completa con la integración de la telemetría, donde la información recolectada se procesa en plataformas en la nube o interfaces móviles intuitivas que democratizan el acceso al dato técnico. Estas herramientas de soporte a la decisión (DSS) generan alertas automatizadas y recomendaciones de riego basadas en la evapotranspiración real, permitiendo al agricultor gestionar las necesidades hídricas de forma granular y remota. De este modo, la tecnología de sensores (ver figuras 1,2,3 y 4) no solo actúa como un termómetro de la humedad, sino como el núcleo de un sistema de inteligencia agraria que asegura la eficiencia hídrica. A continuación, en la Tabla 1, se detallan las características operativas y los principios físicos de los sensores más relevantes en el panorama agronómico actual:

Tabla 1. *Comparativa integral de sensores de humedad del suelo.*

Tecnología	Variable que mide	Principio físico	Nivel de precisión	Ventajas técnicas	Limitaciones	Aplicación recomendada
Tensiómetro	Potencial mátrico (ψm)	Equilibrio hidrológico mediante cápsula cerámica; mide vacío generado por succión del suelo	Alta (en rango operativo)	· Mide esfuerzo real de succión radicular · Excelente para programación fisiológica del riego · Alta confiabilidad histórica	· Cavitación en suelos muy secos · Requiere mantenimiento y cebado · Rango limitado de tensión	Programación de riego en suelos de textura media y gruesa
Sensor capacitivo	Humedad volumétrica	Medición de constante dieléctrica del suelo mediante campo eléctrico de alta frecuencia	Alta	· Bajo mantenimiento · Instalación sencilla · Integración en sistemas automatizados · Bajo consumo energético	· Sensible a variaciones de salinidad · Requiere calibración específica por tipo de suelo	Monitoreo continuo y automatización de riego

Tecnología	Variable que mide	Principio físico	Nivel de precisión	Ventajas técnicas	Limitaciones	Aplicación recomendada
TDR (Reflectometría Dominio Tiempo)	Humedad volumétrica (constante dieléctrica aparente)	Emisión de pulso electromagnético y medición del tiempo de retorno	Muy alta	• Alta exactitud • Buena estabilidad a largo plazo • Ideal para investigación	• Costo elevado • Requiere instalación técnica especializada • Requiere instalación técnica especializada	Ensayos científicos y agricultura de alta precisión
FDR (Reflectometría Dominio Frecuencia)	Humedad volumétrica y salinidad	Medición de atenuación o desplazamiento de fase a frecuencia constante	Alta	• Permite medir salinidad simultáneamente • Respuesta rápida	• Más costoso que sensores capacitivos • Sensible a heterogeneidad del suelo	Agricultura intensiva con control salino
Sensor de neutrones	Humedad volumétrica	Emisión de neutrones rápidos que se ralentizan al interactuar con hidrógeno del agua	Extremadamente alta	• Precisión científica superior • Medición profunda del perfil	• Uso restringido por radiación • Regulaciones estrictas • Alto costo operativo	Investigación científica avanzada

Fuente: esta Investigación

Figura 1. *Tensiómetro para medir la Humedad del suelo.*



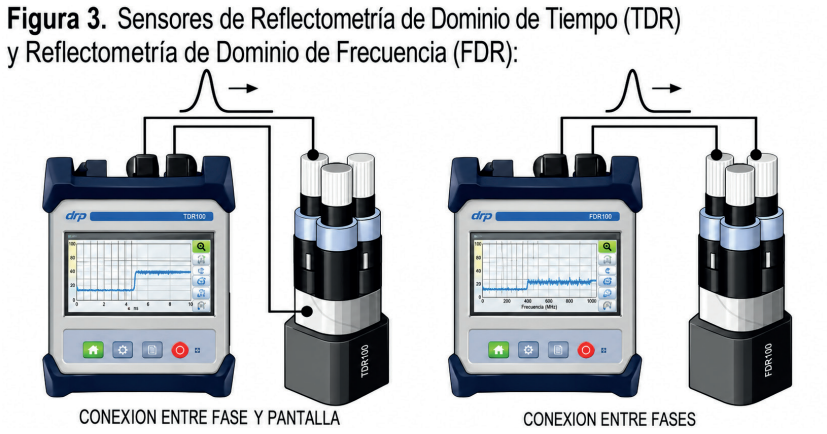
Fuente: Irrometer Company, Inc. - Soil Moisture Measurement (2026)

Figura 2. *Sensor capacitivo para medición dieléctrica del suelo.*



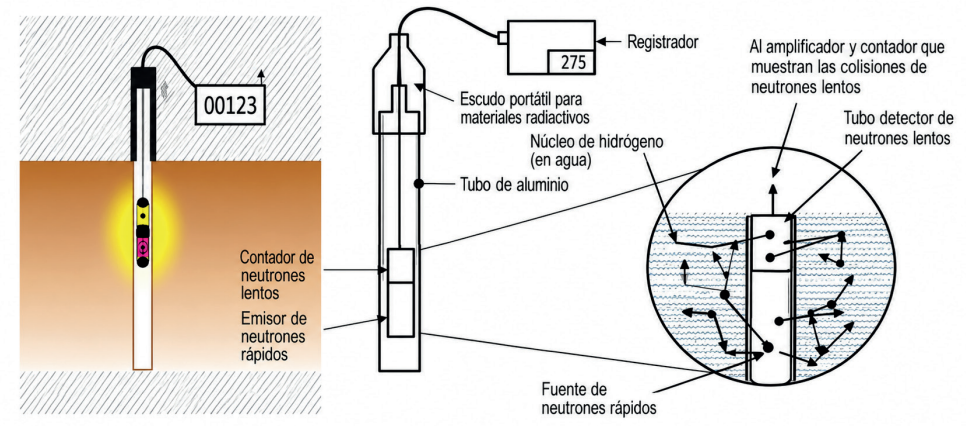
Fuente: DFRobot - Capacitive Soil Moisture Sensor Selection Guide (2026).

Figura 3. *Sensores de Reflectometría de Dominio de Tiempo (TDR) y Reflectometría de Dominio de Frecuencia (FDR):*



Fuente: Josep M. Torrents y Ramon Pallás-Areny (2016)

Figura 4. *Sensor de Neutrones para determinar la humedad del suelo*



Fuente: Modificado de Sensores de Humedad del Suelo | HIBA Formación (2025)

1.2 Estaciones meteorológicas automáticas

Las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) se han consolidado como pilares fundamentales en la programación del riego bajo el enfoque del balance hídrico, transformando la eficiencia en el manejo del recurso mediante el suministro de datos localizados en tiempo real. Estos sistemas permiten la medición continua de parámetros críticos como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación (Jiménez et al., 2023), variables que resultan indispensables para el cálculo preciso de la evapotranspiración del cultivo (ETc).

Al integrar estos flujos de información, es posible cuantificar con exactitud la pérdida total de agua por transpiración vegetal y evaporación del suelo, facilitando el ajuste de las estrategias de riego según las necesidades hídricas específicas de cada etapa fenológica y optimizando, en última instancia, la productividad del agroecosistema. **Medición de Parámetros Clave:** Las EMA registran de manera continua y sistemática parámetros atmosféricos de relevancia agronómica.

La temperatura del aire influye directamente en la tasa de evapotranspiración. La humedad relativa es un determinante crítico para el déficit de presión de vapor y, por ende, para la ETc. La velocidad y dirección del viento afectan significativamente la tasa de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas. La radiación solar es el principal motor energético de la evapotranspiración. Finalmente, la precipitación representa la entrada natural de agua al sistema. La combinación precisa de estas mediciones permite una cuantificación holística de las condiciones ambientales que afectan la demanda hídrica de los cultivos, como se observa en la tabla 2:

Tabla 2: *Comparativa de componentes técnicos en la gestión del riego de precisión*

Componente	Fundamento técnico	Variables involucradas	Modelo / Método	Finalidad en la gestión del riego	Nivel de decisión
Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ETo)	Estimación de la pérdida de agua desde una superficie de referencia hipotética (pasto uniforme bien regado), bajo condiciones estándar. Constituye la base científica para determinar la demanda atmosférica de agua.	Radiación solar, temperatura del aire (máx./mín.), humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica.	Ecuación de Penman–Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998)	Establecer una línea base climática precisa para estimar la demanda hídrica potencial del sistema agrícola.	Estratégico (planificación climática base).

Componente	Fundamento técnico	Variables involucradas	Modelo / Método	Finalidad en la gestión del riego	Nivel de decisión
Estimación de la Evapotranspiración del Cultivo (ETc)	Determinación de la demanda real de agua del cultivo específico, ajustando la ETo mediante coeficientes que incorporan características fisiológicas y condiciones de estrés.	ETo, coeficiente de cultivo (Kc), coeficiente de estrés hídrico (Ks), coeficiente de eficiencia del sistema de riego (Kr), humedad del suelo, etapa fenológica.	ETc = ETo × Kc × Ks × Kr	Determinar con precisión la cantidad de agua que debe aplicarse para mantener productividad óptima, evitando déficit o exceso hídrico.	Operativo–táctico (programación del riego).
Comunicación y almacenamiento de datos (EMA)	Automatización de la captura, transmisión y almacenamiento de datos meteorológicos y edáficos para análisis en tiempo real y generación de históricos climáticos.	Datos meteorológicos continuos, registros de humedad del suelo, conectividad GSM/GPRS/ Wi-Fi, plataformas en la nube, bases de datos históricas.			

Fuente: esta Investigación

1.3 Sensores de cultivo y teledetección

La teledetección, fundamentada en el análisis de imágenes capturadas por satélites, drones y aeronaves equipadas con sensores multiespectrales o hiperespectrales, ha transformado la capacidad de evaluar la salud fitosanitaria y el estrés hídrico a escala de campo completo. Esta tecnología permite identificar con precisión la variabilidad espacial dentro de una misma parcela, facilitando una gestión hídrica zonal mediante el uso de índices especializados como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), los cuales cuantifican la vigorosidad de la planta y su contenido hídrico interno. Al integrar estas imágenes georreferenciadas, es posible delimitar sectores con necesidades hídricas diferenciadas, lo que habilita la aplicación variable de agua y la implementación de estrategias de riego de precisión (Martínez-Casasnovas (2025); Zarco-Tejada et al., (2012), un campo que continúa avanzando exponencialmente gracias a la diversificación de plataformas y sensores disponibles

1.3.1 Plataformas:

- **Satélites:** Estas plataformas proporcionan una cobertura geográfica a gran escala y una recurrencia temporal sistemática, lo que las hace fundamentales para el monitoreo regional y la detección de patrones a nivel macro (Mulla, 2013). Entre las misiones más prominentes se incluyen las series Landsat desarrollada por la NASA y el USGS, los satélites Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la constelación privada Planet Labs; todas ellas ofrecen imágenes multiespectrales con diversas resoluciones espaciales que permiten al gestor hídrico observar la evolución de los cultivos de manera continua y estandarizada a lo largo de los ciclos productivos.

- **Drones (UAVs - Unmanned Aerial Vehicles):** Los vehículos aéreos no tripulados ofrecen una combinación única de alta resolución espacial

y temporal bajo demanda, consolidándose como herramientas ideales para el monitoreo ultra-detallado de parcelas específicas o la evaluación minuciosa de zonas problemáticas. El vertiginoso avance tecnológico, sumado a la creciente facilidad de operación y a la reducción de costos operativos, ha democratizado el acceso a esta herramienta, permitiendo que una amplia gama de productores agrícolas (González et al, 2016) pueda capturar información de alta precisión en momentos críticos del desarrollo del cultivo sin depender de los tiempos de órbita satelital.

- **Aviones Tripulados:** Aunque han sido utilizados tradicionalmente para levantamientos de gran envergadura debido a su capacidad para transportar sensores especializados de mayor tamaño y resolución, su rol en la agricultura actual ha cambiado frente a las nuevas tecnologías. Si bien superan a los drones en capacidad de carga útil y autonomía de vuelo para cubrir extensiones masivas, presentan costos operativos significativamente más elevados y una menor flexibilidad para realizar vuelos específicos bajo demanda, lo que restringe su uso a proyectos de cartografía regional o misiones institucionales de alta complejidad.

1.3.2. Tipos de sensores e índices de vegetación:

Los sensores multiespectrales, cuya operatividad se detalló en secciones previas, resultan fundamentales en este proceso al capturar la reflectancia de la vegetación en diversas bandas del espectro electromagnético, con especial énfasis en las regiones del visible y el infrarrojo cercano. Esta capacidad técnica, respaldada por décadas de investigación sobre la interacción física de la luz con las estructuras celulares de las plantas, ha culminado en el desarrollo de numerosos índices espectrales; dichas herramientas matemáticas permiten traducir la energía radiante captada en indicadores biofísicos precisos, facilitando el diagnóstico del estado fisiológico y nutricional del cultivo de manera no invasiva.

- NDVI: Considerado el índice más utilizado en la teledetección agrícola, el NDVI se calcula mediante la relación {NIR - Red}/{NIR + Red}, donde NIR representa la reflectancia en el infrarrojo cercano y Red en el rojo visible. Este indicador se basa en que las plantas sanas y vigorosas, con alto contenido de clorofila y biomasa densa, reflejan fuertemente el NIR y absorben la luz roja, resultando en valores elevados; por el contrario, valores bajos pueden ser señales tempranas de estrés hídrico, enfermedades o deficiencias nutricionales. Su implementación, popularizada a partir de los trabajos de Tucker (1981), lo ha consolidado como un estándar indispensable para el monitoreo de la salud vegetal.

- NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada): Este índice, cuya expresión matemática es {NIR - SWIR}/{NIR + SWIR}, utiliza la reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR) para evaluar específicamente el estado hídrico de la cobertura vegetal. A diferencia del NDVI, el NDWI es altamente sensible a los cambios en la turgencia y la concentración de agua foliar, lo que lo convierte en una herramienta superior para detectar el estrés hídrico antes de que se produzcan daños permanentes en los tejidos. Gracias a su capacidad para diferenciar el contenido de agua tanto en la planta como en el suelo, es un recurso invaluable para la programación precisa de los turnos de riego (Gao, 1996).

- Otros Índices Espectrales: Más allá de los indicadores clásicos, la comunidad científica ha desarrollado una amplia gama de índices para aplicaciones específicas que responden a diversas condiciones ambientales. Un ejemplo notable es el EVI (Enhanced Vegetation Index), diseñado para ser menos sensible a la influencia del suelo subyacente y a las interferencias atmosféricas, lo que ofrece mayor robustez en zonas con vegetación densa (Huete et al., 2002). Asimismo, existen índices especializados en cuantificar el área foliar o la concentración de pigmentos específicos, permitiendo

un análisis multidimensional de los parámetros biofísicos que determinan el rendimiento potencial de los cultivos.

- Sensores Térmicos y Termografía: Estos dispositivos permiten medir la temperatura de la superficie vegetal, un indicador crítico del estado metabólico de la planta. El principio fundamental reside en que, ante un estrés hídrico, las plantas cierran sus estomas para reducir la pérdida de agua, limitando la refrigeración por transpiración y provocando un aumento detectable en la temperatura foliar (Jones, 1999). Los mapas térmicos generados por estos sensores actúan como un sistema de alerta temprana, identificando anomalías fisiológicas antes de que los síntomas sean visibles al ojo humano, lo que facilita una intervención de riego inmediata y localizada.

La integración de estas diversas tecnologías de teledetección y el análisis avanzado de los índices espectrales permiten la generación de mapas de zonificación de riego con una alta precisión espacial. Al identificar áreas con requerimientos hídricos diferenciados dentro de una misma unidad productiva, esta cartografía técnica facilita la transición desde métodos de aplicación uniforme hacia el desarrollo e implementación del riego de tasa variable (Baluja et al., 2012). Este enfoque no solo optimiza el uso del recurso hídrico, sino que representa el pilar fundamental de la agricultura de precisión, donde cada sector del cultivo recibe el aporte exacto de agua necesario para maximizar su potencial productivo.

1.3.3 Sistemas de riego de precisión (VRI - variable rate irrigation)

Los sistemas de riego de precisión con VTR (VRI, por sus siglas en inglés) representan la máxima integración de las herramientas tecnológicas analizadas. Al procesar de forma sinérgica los datos de sensores de humedad, estaciones meteorológicas y teledetección, estos sistemas permiten una aplicación hídrica diferencial y georreferenciada dentro de una misma parcela agrícola en tiempo real o casi real. Un ejemplo destacado es el pivote

central equipado con tecnología VRI, el cual puede gestionar boquillas individuales o secciones de manera independiente; esto faculta al productor para regar exclusivamente las zonas con déficit o ajustar los volúmenes en función de la variabilidad edáfica y las necesidades fenológicas específicas. De este modo, se maximiza la eficiencia en el uso del recurso y se minimiza el desperdicio, consolidando la sostenibilidad hídrica en la unidad productiva (Evans & Sadler, 2008). Bajo este enfoque de alta precisión, los sistemas más destacados se describen a continuación:

Pivotes Centrales y Laterales con VRI: Debido a su diseño estructural y su amplia capacidad de cobertura, los sistemas de pivote central y avance lateral son plataformas idóneas para la integración de la tecnología VRI, la cual permite el control individualizado de cada aspersor o sección mediante válvulas electrónicas de precisión. Este control se ejerce regulando el flujo de agua en boquillas específicas o variando la velocidad de avance del equipo en segmentos determinados para ajustar las tasas de aplicación (O'Shaughnessy et al., 2016). La precisión operativa se garantiza mediante un sistema de posicionamiento global (GPS) montado en la estructura, el cual comunica la ubicación exacta al controlador para ejecutar un "mapa de prescripción" previamente cargado; este mapa define volumétricamente las necesidades hídricas de cada punto del campo, una innovación que ha transformado la eficiencia del riego a gran escala desde principios del siglo XXI (Ver **figura 5**).

Figura 5. *Sistema de riego de precisión con Pivotes Centrales y Laterales VRI*

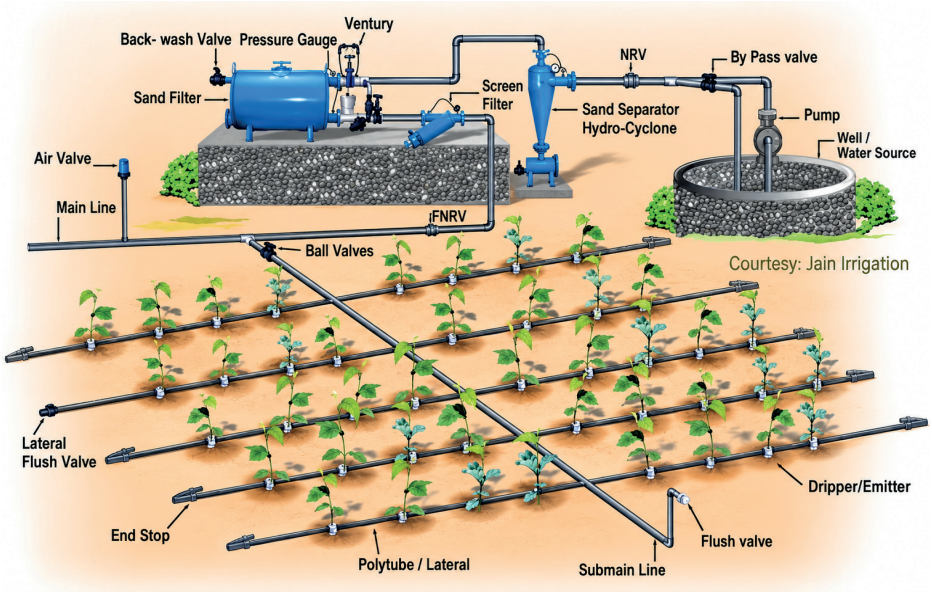


Fuente: Ferreyros distribuirá equipos de riego por pivote “Valley” | AGAP (2025)

- Riego por Goteo de Tasa Variable: Aunque su implementación presenta una mayor complejidad técnica en comparación con los sistemas de pivote, los avances en microelectrónica y válvulas de alta precisión están impulsando la adopción de sistemas de goteo de tasa variable. Esta modalidad permite regular emisores individuales o secciones específicas de líneas de goteo mediante válvulas automatizadas, con el fin de ajustar el volumen de agua según la variabilidad espacial del suelo como su textura y capacidad

de retención o las necesidades hídricas detectadas directamente en la planta (Sadler et al., 2005). Gracias a esta gestión granular, es posible maximizar la eficiencia del recurso y minimizar el desperdicio, especialmente en cultivos de alto valor o en terrenos con una marcada heterogeneidad donde la distribución uniforme del agua resulta un desafío operativo constante (Ver figura 6).

Figura 6. *Sistema de riego por goteo de tasa variable*



Fuente: Riego por goteo - Top 10 Top Ten (2025)

- Integración y Control: El componente central de un sistema VRI es su unidad de control centralizada o “cerebro operativo”, la cual procesa flujos continuos de datos provenientes de sensores de humedad, estaciones meteorológicas, mapas de teledetección y pronósticos climáticos. Mediante algoritmos de optimización y modelos de simulación de balance hídrico, esta unidad genera un

"mapa de prescripción de riego": una instrucción técnica detallada que define la tasa de aplicación y la duración del evento hídrico para cada subzona específica del campo. Estos sistemas avanzados permiten al agricultor operar y monitorear la red de forma remota a través de interfaces web o aplicaciones móviles, otorgando una flexibilidad inigualable para la gestión del recurso desde cualquier ubicación geográfica (Evans et al., 2013). Esta capacidad de control basado en datos integrados es, en última instancia, lo que define una verdadera gestión de precisión, garantizando que cada gota de agua se traduzca en productividad real.

La implementación sinérgica de estas tecnologías no solo optimiza el uso del agua un recurso cada vez más escaso y valioso, sino que potencia la eficiencia de otros insumos críticos mediante un efecto en cadena. Al aplicar el riego con precisión, se reduce drásticamente la lixiviación de fertilizantes fuera de la zona radicular, lo que maximiza el aprovechamiento nutricional por el cultivo y mitiga la contaminación de acuíferos y aguas superficiales. Adicionalmente, esta gestión técnica minimiza los costos energéticos de bombeo al evitar aplicaciones redundantes, fortaleciendo la rentabilidad de la unidad productiva. En última instancia, la complementariedad entre estos avances define la capacidad de la agricultura de precisión para consolidar sistemas hídricos sostenibles y eficientes, elementos fundamentales para garantizar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los desafíos del cambio climático y la creciente demanda global de alimentos.

2. Programación del riego basada en datos climáticos y del suelo

La programación del riego en el marco de la agricultura de precisión ha trascendido los métodos empíricos tradicionales para adoptar un enfoque rigurosamente científico, fundamentado en la integración de datos objetivos y décadas de investigación interdisciplinaria en hidrología agrícola, agronomía, edafología y SIG. Este paradigma moderno busca determinar con exactitud el 'cuándo' y el 'cuánto' regar, con el objetivo primordial de garantizar la suficiencia hídrica para el desarrollo óptimo del cultivo; de

este modo, se evitan simultáneamente los excesos que derivan en lixiviación de nutrientes o anoxia radicular, así como los déficits que provocan estrés hídrico y reducciones en el rendimiento (Allen et al., 1998; Campbell & Norman, 1998). La clave de este éxito reside en la modelación precisa del complejo balance hídrico dentro del sistema suelo-planta-atmósfera, un proceso metodológico que se delimita a continuación para asegurar una gestión hídrica eficiente y sostenible.

2.1. Modelos de balance hídrico del suelo

El elemento central y metodológico en la programación del riego de precisión es el modelo de balance hídrico del suelo, una representación matemática simplificada, pero rigurosa, de las entradas y salidas de agua que ocurren en el perfil del suelo dentro de la zona radicular activa. Su formulación se fundamenta estrictamente en la ley universal de conservación de la masa aplicada al ciclo hidrológico edáfico, una base conceptual que ha sido perfeccionada continuamente por investigadores en los campos de la hidrología, la edafología y la ingeniería de recursos hídricos (Monteith & Unsworth, 2013). Bajo este principio de equilibrio de masas, la dinámica del agua en un volumen determinado de suelo se describe a través de la siguiente ecuación fundamental:

$$\Delta S = P + I - ETc - D - R$$

Donde:

• ΔS (Cambio en el Almacenamiento de Agua en el Suelo):	Representa el cambio en el contenido de humedad del suelo en la zona radicular durante un período de tiempo.
• P (Precipitación):	La cantidad de lluvia que ingresa al sistema.
• I (Riego):	La cantidad de agua aplicada a través del riego.

• ETc (Evapotranspiración del Cultivo):	El agua que el cultivo consume y que se evapora de la superficie del suelo. Este es el principal componente de salida y se calcula a partir de datos climáticos y características del cultivo, como se explicó en el subcapítulo anterior (a menudo usando el enfoque Penman-Monteith con coeficientes de cultivo).
• D (Drenaje Profundo):	El agua que se mueve por debajo de la zona radicular, fuera del alcance del cultivo. Este componente es crítico para evitar el anegamiento y la lixiviación de nutrientes.
• R (Escorrentía Superficial):	El agua que fluye sobre la superficie del suelo.

La sofisticación de estos modelos de balance hídrico ha experimentado un crecimiento exponencial, permitiendo en la actualidad integrar variables críticas de alta complejidad como la variabilidad espacial de la textura y estructura del suelo, su capacidad de retención hídrica, la arquitectura radicular del cultivo, el ascenso capilar desde estratos freáticos y la dinámica de la salinidad. Este avance se sustenta en los marcos teóricos y metodologías estándar proporcionados por referentes fundamentales en el área; destacan los trabajos de Campbell y Norman sobre física del suelo y transferencia de masa y energía, así como las directrices de la FAO para la determinación de las necesidades de agua de los cultivos. Este último esfuerzo, liderado por investigadores como Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes y Martin Smith (Allen et al., 1998), ha sido crucial para transformar modelos complejos en herramientas prácticas y aplicables que optimizan la producción agrícola a nivel global.

A continuación, damos un caso práctico para aplicar esta fórmula:

Don Pedro, un agricultor que cultiva maíz busca optimizar su riego para ahorrar agua, pero también quiere asegurar un buen rendimiento. Para esto, decide aplicar el modelo de balance hídrico.

Datos Iniciales (1 de junio):

- Cultivo: Maíz (en etapa de crecimiento vegetativo, donde la demanda de agua es moderada).

- Tipo de Suelo: Franco-arcilloso (lo que significa que tiene una buena capacidad de retención de agua).

- Zona Radicular Efectiva: Se estima que las raíces del maíz exploran hasta 60 cm de profundidad en esta etapa.

- Humedad Inicial del Suelo (ΔSinicial): Don Pedro midió la humedad del suelo y determinó que el suelo está al 70% de su capacidad de campo. El suelo franco-arcilloso tiene una capacidad de campo de 300 mm/m de profundidad. Para una zona radicular de 0.6 m, la capacidad máxima de agua es de 300 mm/m×0.6 m=180 mm. Entonces, la humedad inicial es de 180 mm×0.70 =126 mm.

- Umbral de Riego: Don Pedro sabe que, para evitar estrés hídrico significativo en el maíz, no debe permitir que el contenido de humedad del suelo caiga por debajo del 50% de la capacidad de campo. Esto equivale a 180 mm×0.50=90 mm. Si el agua en el suelo baja de este nivel, debe regar.

Seguimiento Diario (2 de junio):

Don Pedro consulta los datos meteorológicos y observa:

Precipitación (P): No llovió el 2 de junio (0 mm).

- Riego (I): Don Pedro no regó el 2 de junio (0 mm).

- Evapotranspiración del Cultivo (ETc): Usando los datos climáticos de la estación cercana (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento) y el coeficiente de cultivo (Kc) para el maíz en su etapa actual, se calcula una ETc diaria de 4 mm. Este cálculo se basa en el método de Penman-Monteith y el Kc adecuado para el maíz en crecimiento.

- Drenaje Profundo (D): Se asume 0 mm, ya que el suelo no está saturado y no hubo eventos de riego o lluvia excesivos.

- Escorrentía Superficial (R): Se asume 0 mm, ya que no hubo lluvia intensa ni riego que superara la infiltración del suelo.

Cálculo del Balance Hídrico para el 2 de junio:

La ecuación de balance hídrico es: $\Delta S = P + I - ET c - D - R$

Sustituyendo los valores: $\Delta S = 0 \text{ mm} + 0 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 0 \text{ mm} - 0 \text{mm}$
$\Delta S = -4 \text{ mm}$

Esto significa que el contenido de agua en el suelo disminuyó en 4 mm durante el 2 de junio.

Contenido de Agua en el Suelo al Final del Día (2 de junio):

Humedad al final del día = Humedad inicial (ΔSinicial) + ΔS Humedad al final del día =

126 mm + (− 4 mm) = 122 mm

Decisión de Riego para el 3 de junio:

Don Pedro compara el contenido de agua actual (122 mm) con su umbral de riego (90 mm). Como 122 mm es mayor que 90 mm, Don Pedro decide que no es necesario regar el maíz el 3 de junio.

Seguimiento Continuo:

Don Pedro continuaría este proceso diariamente, monitoreando la ETc, la lluvia y el contenido de humedad del suelo. Por ejemplo, si en los días siguientes la ETc sigue siendo de 4 mm/día y no llueve:

3 de junio: Humedad = 122 mm –4 mm = 118 mm

4 de junio: Humedad = 118 mm – 4 mm = 114 mm

10 de junio: Humedad = 122 mm – (8 dias × 4 mm/día) = 122 mm – 32 mm = 90 mm

En este punto (10 de junio), el contenido de humedad del suelo ha alcanzado el umbral de riego. Si la previsión para el 11 de junio no indica lluvia, Don Pedro programará un riego para ese día. La cantidad a aplicar sería la diferencia entre la capacidad de campo y el umbral de riego (o el contenido actual), por ejemplo, para llevarlo de 90 mm a 180 mm, necesitaría aplicar 90 mm de agua.

Beneficios de este Modelo para Don Pedro:

- Uso Eficiente del Agua: Riega solo cuando es necesario, evitando el riego excesivo y el desperdicio de agua.
- Ahorro de Costos: Reduce los costos de bombeo y energía asociados al riego.
- Mejor Rendimiento del Cultivo: Asegura que el cultivo tenga la humedad necesaria en el momento adecuado, evitando el estrés hídrico que puede reducir la producción.
- Manejo de Nutrientes: Minimiza la lixiviación de nutrientes al reducir el drenaje profundo innecesario.

Este ejemplo ilustra cómo un agricultor, con datos relativamente sencillos y una comprensión del modelo de balance hídrico, puede tomar decisiones informadas para la programación del riego, optimizando tanto el uso del agua como la productividad del cultivo.

2.2. Umbrales de riego dinámicos y estado hídrico del cultivo

En contraposición a los esquemas convencionales basados en calendarios fijos, la programación de riego de precisión se fundamenta en la utilización de umbrales dinámicos que activan la aplicación de agua exclusivamente cuando las condiciones del sistema lo demandan. Estos umbrales no son estáticos; por el contrario, evolucionan a lo largo del ciclo fenológico del cultivo y fluctúan en respuesta a la demanda evaporativa del ambiente, derivándose de un análisis integrado de datos complejos provenientes del perfil del suelo, el microclima y, en aplicaciones de alta tecnología, del estado hídrico fisiológico de la propia planta (Jones, 2004; Allen et al., 1998). La evidencia generada por la investigación agrícola contemporánea demuestra que este enfoque supera significativamente en eficiencia y precisión a las metodologías tradicionales, permitiendo un manejo del recurso hídrico que se ajusta en tiempo real a la realidad biológica del ecosistema productivo:

- Umbral de Humedad del Suelo: Este criterio se fundamenta en los datos continuos proporcionados por sensores que monitorean la zona radicular activa, activando el riego cuando el contenido hídrico desciende por debajo de un porcentaje predefinido de la Capacidad de Campo (CC) o cuando la tensión matricial excede un valor umbral específico para el binomio suelo-cultivo. En este contexto, es vital diferenciar entre el Punto de Marchitez Permanente (PMP), que marca el límite inferior de supervivencia, y la Capacidad de Campo, que representa el límite superior de retención gravitatoria. La investigación agronómica ha determinado que mantener la humedad edáfica entre el 60% y el 80% de la CC asegura un desarrollo vigoroso y maximiza el rendimiento en una amplia diversidad de especies (Zhang et al., 2012; Kirkham, 2014), estableciendo así un rango operativo que evita tanto el estrés por déficit como la hipoxia radicular.

- Umbral Basado en ETc Acumulada: Esta metodología se basa en la cuantificación diaria de la Evapotranspiración del Cultivo (ETc) mediante el modelo de Penman-Monteith y los datos de la estación meteorológica automática (Allen et al., 1998). El sistema acumula estas pérdidas diarias hasta alcanzar un umbral crítico que representa el agotamiento de una fracción específica del agua fácilmente disponible en el suelo; en ese punto, se programa un evento de riego para reponer exactamente el volumen transpirado y evaporado. Este enfoque predictivo permite ajustar el suministro hídrico a la demanda atmosférica real, eliminando la incertidumbre de los calendarios fijos y garantizando que el balance hídrico se mantenga en niveles óptimos para la productividad sin incurrir en el sobre-riego.

- Índices de Estrés Hídrico de la Planta: Las tecnologías de vanguardia trascienden los datos del entorno para monitorear directamente la respuesta fisiológica del cultivo mediante índices de teledetección como el NDWI o el Índice de Estrés por Temperatura del Canope (TCI). Estas herramientas proporcionan una indicación precisa del estado hídrico de la vegetación (Jones, 2004) y, aunque en investigación se complementan con mediciones de potencial hídrico foliar, en la práctica comercial permiten validar y refinar los modelos de suelo y clima. Un avance fundamental de la fisiología aplicada es la capacidad de ajustar estos umbrales según la fase fenológica, permitiendo, por ejemplo, una mayor tolerancia al estrés en etapas vegetativas tempranas y una sensibilidad crítica durante la floración y el llenado de grano, donde cualquier déficit impactaría drásticamente en el rendimiento final.

2.3. Integración de datos y plataformas de gestión de riego

La programación efectiva del riego, bajo los estándares de precisión descritos, se alcanza mediante la integración sistemática y el análisis sofisticado de grandes volúmenes de datos en plataformas de gestión

agrícola especializadas. Estos ecosistemas digitales actúan como el cerebro central de la operación (Irmak et al., 2016), procesando de forma sinérgica la información proveniente de múltiples fuentes para generar recomendaciones técnicas precisas; de este modo, se logra optimizar con rigor científico tanto el momento oportuno de aplicación como la lámina de agua exacta, garantizando una eficiencia máxima en el uso del recurso hídrico.

2.3.1. Fuentes de datos

Provenientes de:

- Sensores de suelo: Estos dispositivos proporcionan datos continuos y en tiempo real sobre la humedad volumétrica y la temperatura edáfica a diferentes profundidades, ofreciendo una visión dinámica de la disponibilidad hídrica en la rizosfera. Esta monitorización constante permite al gestor entender el comportamiento del agua en el perfil del suelo y la velocidad de extracción por parte de las raíces, asegurando que el contenido de agua se mantenga siempre dentro de los umbrales de aprovechamiento óptimo para el cultivo.

- Estaciones meteorológicas: Estas herramientas suministran datos climáticos locales actualizados y pronósticos a corto y mediano plazo, elementos que resultan esenciales para el cálculo preciso de la evapotranspiración y la predicción de la demanda hídrica atmosférica. Al integrar variables como la radiación, el viento y la humedad relativa, las estaciones permiten anticiparse a picos de estrés hídrico y ajustar la programación del riego antes de que las condiciones ambientales críticas afecten la tasa transpirativa del cultivo.

- Imágenes satelitales y drones: Estas plataformas de teledetección ofrecen mapas de vigor vegetativo e índices de estrés hídrico que permiten caracterizar con precisión la variabilidad espacial dentro del campo. Gracias a esta perspectiva aérea, es posible identificar

zonas con necesidades hídricas diferenciadas, facilitando la transición de un manejo uniforme a una gestión de precisión que responde a la heterogeneidad real de la parcela mediante aplicaciones de tasa variable.

- Mapas de suelo: La información geoespacializada sobre propiedades edáficas clave, como la textura, la topografía y la capacidad de retención de agua, constituye la base estructural de cualquier modelo de riego. Estos mapas permiten definir las unidades de manejo hidráulico, ya que determinan cómo se mueve el agua en el perfil y cuánto tiempo permanece disponible para la planta, evitando pérdidas por escorrentía o lixiviación profunda en sectores con baja capacidad de retención.

- Datos del cultivo: La integración de información específica sobre la fenología, la variedad genética y la densidad de siembra es fundamental para personalizar la demanda hídrica. Dado que las necesidades de agua varían drásticamente entre las etapas vegetativas y reproductivas, el seguimiento detallado de estos parámetros agronómicos asegura que el riego se ajuste estrictamente a las prioridades fisiológicas del cultivo en cada fase de su desarrollo.

- Datos históricos: El almacenamiento y análisis de registros de rendimientos anteriores, patrones climáticos pasados e históricos de riego permiten la calibración y validación de modelos predictivos de alta fidelidad. Este repositorio de información no solo facilita la identificación de tendencias a largo plazo, sino que permite perfeccionar las estrategias de manejo año tras año, convirtiendo la experiencia acumulada en un activo científico para la optimización del recurso hídrico.

2.3.2. Algoritmos y modelos predictivos

Las plataformas de gestión de riego emplean algoritmos sofisticados y modelos matemáticos avanzados para:

- Simulación y Modelado Dinámico: Las plataformas de gestión avanzada ejecutan modelos complejos de balance hídrico suelo-planta-atmósfera que permiten simular el movimiento del agua y su disponibilidad real en el perfil edáfico. Mediante el cálculo de la Evapotranspiración del Cultivo (ETc) con alta precisión utilizando datos meteorológicos locales y coeficientes de cultivo ajustados a la fenología real, estos sistemas pueden predecir el agotamiento de la humedad en el suelo con días de antelación. Esta capacidad predictiva actúa como un sistema de alerta temprana que permite intervenir antes de que el cultivo experimente cualquier grado de estrés fisiológico, garantizando la estabilidad del rendimiento potencial.

- Optimización Espacial y Prescripción: Una de las funcionalidades más potentes es la generación de mapas de prescripción de riego variable, los cuales traducen los datos de variabilidad espacial en instrucciones técnicas detalladas. Estos mapas especifican la cantidad exacta de agua a aplicar en cada punto o zona del campo, optimizando el uso del recurso según las necesidades heterogéneas de la parcela. De este modo, el sistema de riego deja de ser una herramienta de aplicación uniforme para convertirse en un dispositivo de precisión que minimiza las pérdidas por escorrentía o lixiviación en sectores con baja capacidad de retención.

- Integración Predictiva y Sostenibilidad: La arquitectura de estas plataformas permite integrar pronósticos meteorológicos de forma dinámica para ajustar las estrategias de riego futuras de manera proactiva. Por ejemplo, el sistema puede posponer automáticamente un evento de riego planificado si se detecta una probabilidad

significativa de precipitaciones, evitando así el sobre-riego y el desperdicio de energía y agua. Esta sinergia entre el monitoreo en tiempo real y la predicción climática es lo que confiere a la agricultura de precisión la resiliencia necesaria para operar de manera sostenible en escenarios de alta variabilidad ambiental.

2.3.3. Interfaces de usuario y automatización

Las plataformas avanzadas de gestión de riego han evolucionado hacia interfaces gráficas intuitivas que permiten a los agricultores visualizar el estado hídrico de sus parcelas en tiempo real, facilitando la recepción de alertas personalizadas y recomendaciones técnicas precisas. La eficacia de estos sistemas reside en la comunicación bidireccional entre el software y los equipos de campo como pivotes VRI o redes de goteo automatizadas, una sinergia tecnológica que resulta fundamental para la implementación efectiva de la tasa variable y la automatización integral del proceso. Este ecosistema digital, liderado por empresas y plataformas como Lindsay (FieldNET), Valley (Valley ICON), John Deere (Operations Center) y diversas startups especializadas, permite el control remoto de los dispositivos desde cualquier punto con conexión a internet; de este modo, se ha transformado la gestión del agua en la agricultura, pasando de una supervisión manual a una administración inteligente y centralizada (O'Shaughnessy et al., 2016; Irmak et al., 2016) (Ver **figura 7**).

Figura 7. *Sistema de riego de precisión nutrientes y agua - SWAN*



Fuente: SWAN Systems Spanish | Software de riego de precisión, nutrientes y agua (2025)

2. Ahorro de recursos y mejora del rendimiento

La agricultura de precisión, mediante la optimización metódica del riego, trasciende la noción de una simple mejora incremental para consolidarse como un cambio de paradigma que materializa eficiencias operacionales profundas y beneficios económicos de gran magnitud. En un escenario global definido por la presión sobre recursos naturales finitos y una demanda alimentaria en ascenso, la capacidad de maximizar la productividad con un menor uso de insumos se posiciona como un imperativo estratégico fundamental. Especialmente en regiones donde la agricultura es un pilar económico, la adopción de estas tecnologías es crítica para enfrentar patrones climáticos volátiles y la creciente competencia intersectorial por el agua; de este modo, la gestión de precisión se convierte en el motor de la resiliencia y la prosperidad sectorial, asegurando la sostenibilidad de los sistemas productivos frente a la incertidumbre del siglo XXI (Fereres & Soriano, 2007).

3.1. Ahorro sustancial de agua: la cifra clave de la sostenibilidad

El ahorro de agua emerge como el beneficio más directo, cuantificable y tangible de la optimización del riego mediante la implementación de tecnologías de precisión. La premisa subyacente es fundamentalmente simple, pero su impacto resulta poderosamente transformador: aplicar la cantidad exacta de agua requerida por el cultivo, en el momento preciso de su necesidad fisiológica y exclusivamente en las zonas donde es realmente indispensable. Esta precisión quirúrgica elimina el desperdicio sistémico asociado a los métodos convencionales de aplicación uniforme, permitiendo que cada metro cúbico de agua se traduzca en biomasa productiva y reduciendo drásticamente la presión sobre los acuíferos y las fuentes superficiales, lo cual es esencial para la viabilidad de la agricultura en entornos de escasez hídrica.

3.1.1 Los métodos de riego convencionales suelen suministrar volúmenes de agua que sobrepasan las necesidades reales del cultivo, bajo la premisa empírica de asegurar la disponibilidad hídrica sin considerar los coeficientes de eficiencia operativa. Esta práctica, fundamentada en la aplicación uniforme de excedentes, conduce a pérdidas significativas del recurso a través de mecanismos hidrológicos indeseables que comprometen la sostenibilidad del sistema productivo. A continuación, se detallan los procesos físicos que se activan ante esta gestión ineficiente y que la agricultura de precisión busca mitigar mediante el control de la tasa variable.

- Drenaje profundo y lixiviación de solutos: El agua que percola por acción de la gravedad más allá de la zona radicular activa se vuelve inaccesible para la planta, representando una pérdida neta en el balance hídrico. Este proceso es particularmente crítico desde el punto de vista nutricional, ya que el flujo descendente arrastra consigo aniones móviles y nutrientes valiosos, como los nitratos, que no solo se pierden del sistema productivo, sino que actúan como contaminantes de los acuíferos subterráneos. La agricultura

de precisión mitiga este fenómeno al ajustar la lámina de riego a la capacidad de almacenamiento de la zona radicular, evitando que el frente de humedecimiento sobrepase la profundidad de absorción efectiva.

- Escorrentía superficial y erosión hídrica: La escorrentía ocurre cuando la tasa de aplicación de agua supera la capacidad de infiltración del suelo, generando un flujo superficial que no es absorbido por el perfil. Este fenómeno constituye una ineficiencia directa del recurso y es un agente causal de la erosión hídrica del terreno; además, actúa como vector de transporte para agroquímicos especialmente fertilizantes fosforados y pesticidas hacia cuerpos de agua superficiales, desencadenando procesos de eutrofización e impactos ambientales negativos. El manejo de precisión corrige este problema mediante la zonificación del campo y el ajuste de las tasas de aplicación según la topografía y la textura específica de cada sector.

- Evaporación y derivas por condiciones ambientales: La evaporación superficial excesiva es un factor determinante en la reducción de la eficiencia global del riego.

3.1.2 Al integrar de forma coherente los datos de sensores de humedad edáfica, la información climatológica de estaciones meteorológicas automáticas para el cálculo de la evapotranspiración real del cultivo (ETc) y los mapas de variabilidad espacial generados por teledetección, los sistemas de agricultura de precisión alcanzan una gestión hídrica sin precedentes. Esta convergencia tecnológica permite trascender las aplicaciones uniformes para habilitar una operatividad granular y predictiva; específicamente, estas herramientas facultan al gestor para ejecutar una programación basada en la demanda fisiológica exacta, permitiendo:

- Riego Deficitario Controlado (RDC): Esta estrategia avanzada permite aplicar volúmenes de agua ligeramente inferiores a la ETc máxima durante etapas fenológicas no críticas, sin comprometer significativamente el rendimiento final ni la calidad del producto. Al inducir un estrés hídrico moderado y programado, se maximiza la eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA), promoviendo respuestas fisiológicas que optimizan la partición de asimilados y la resiliencia de la planta (Fereres & Soriano, 2007). La precisión en el monitoreo es vital en el RDC, ya que permite mantener al cultivo en un equilibrio delicado donde se ahorra el recurso sin traspasar los umbrales de daño irreversible.

- Riego por Demanda y Control de Umbrales: A diferencia de los calendarios fijos, este enfoque activa el suministro hídrico exclusivamente cuando los sensores detectan un estrés incipiente en el sistema suelo-planta. Esta metodología previene tanto el agotamiento severo del agua fácilmente disponible (AFD) como el sobre-riego, logrando un balance dinámico entre la oferta hídrica y la demanda atmosférica. Al operar bajo este esquema, el sistema de riego se convierte en una herramienta reactiva y precisa que garantiza que el potencial hídrico de la planta se mantenga siempre dentro de rangos que favorezcan la conductancia estomática y la fotosíntesis óptima.

- VTR (VRI): Representa una de las capacidades más disruptivas de la agricultura de precisión, al permitir la entrega de láminas de agua diferenciadas dentro de una misma parcela. El VRI se adapta dinámicamente a las variaciones intrínsecas de la textura del suelo gestionando, por ejemplo, la baja capacidad de retención de sectores arenosos frente a la alta retención de zonas arcillosas y a la topografía del terreno (Evans & Sadler, 2008). Esta capacidad de zonificación anula las ineficiencias de los métodos uniformes tradicionales, donde inevitablemente algunas zonas quedaban sub-irrigadas mientras otras sufrían lixiviación o encharcamiento.

3.1.3 La evidencia científica y la casuística global desde las vastas extensiones de Estados Unidos y Australia hasta explotaciones de escala media en Europa y América Latina documentan de manera consistente ahorros de agua que oscilan entre el 20% y el 50%. Aunque este porcentaje fluctúa según el tipo de cultivo, las condiciones climáticas regionales y la eficiencia del método de riego previo, el impacto positivo en la sostenibilidad del recurso es incuestionable y constituye un pilar para la resiliencia agrícola (Fereres & Soriano, 2007; Zhang et al., 2012). Es fundamental considerar que el agua posee un valor económico intrínseco; por tanto, su gestión optimizada mediante tecnologías de precisión no solo mitiga el riesgo ambiental, sino que se traduce directamente en una mejora de la rentabilidad neta, transformando el ahorro del recurso en una ventaja competitiva para la explotación:

- Eficiencia Energética y Reducción de Costos Operativos: En las explotaciones agrícolas modernas, especialmente aquellas que dependen de sistemas a presión (aspersión y goteo) o de la extracción desde acuíferos profundos, el bombeo de agua representa uno de los mayores centros de costo energético. Al optimizar el balance hídrico y reducir el volumen total de agua movilizada, se genera un descenso directamente proporcional en el consumo de electricidad o combustibles fósiles. Este ahorro energético no es marginal; impacta de forma sustancial en el margen neto de la operación, transformando la eficiencia hídrica en una reducción crítica de los costos fijos de producción.

- Optimización de Insumos y Sanidad Radicular: El riego excesivo es el principal precursor de la lixiviación de nutrientes móviles, como los nitratos, desplazándolos fuera de la zona radicular activa hacia estratos inaccesibles. La agricultura de precisión mitiga esta pérdida económica y ambiental al controlar la lámina aplicada, garantizando que el fertilizante permanezca en la rizosfera para su absorción efectiva. Adicionalmente, al evitar condiciones de anoxia

y encharcamiento, se regula el microclima edáfico, reduciendo la proliferación de patógenos fúngicos y radiculares que prosperan en excesos de humedad. Esto no solo mejora la sanidad del cultivo, sino que disminuye significativamente la dependencia y el gasto en fungicidas y otros agroquímicos (Zhang et al., 2012).

- Gestión Avanzada del Capital Humano: La integración de la automatización y el monitoreo remoto en los sistemas de precisión redefine el rol de la mano de obra en el campo. Si bien requiere una inversión tecnológica inicial, esta capacidad reduce la necesidad de intervenciones manuales constantes para la supervisión y operación del riego. Al minimizar el riesgo de error humano en la programación, el personal puede ser reubicado en tareas de mayor valor estratégico y análisis de datos, optimizando la eficiencia del capital humano y permitiendo una gestión más profesionalizada y menos reactiva de la explotación.

- Sostenibilidad de la Infraestructura y Mantenimiento: La operación inteligente de los sistemas de riego, basada en la demanda real y no en calendarios fijos, mitiga el desgaste mecánico prematuro de los componentes críticos. Al reducir las horas de funcionamiento innecesario y estabilizar las presiones de trabajo, se prolonga la vida útil de bombas, tuberías, válvulas y emisores. Esta gestión conservadora de la infraestructura disminuye los costos de mantenimiento correctivo y retrasa la necesidad de reinversión en equipos, consolidando la sostenibilidad económica a largo plazo de la inversión en riego.

3.2 Incremento del rendimiento y la calidad del cultivo: cosechas más abundantes y valiosas

Si bien el ahorro de recursos constituye un beneficio fundamental y tangible, el verdadero poder transformador de la agricultura de precisión radica en su capacidad para optimizar intrínsecamente las condiciones

de crecimiento de las plantas. Este control micro climático y dinámico en la zona radicular permite mantener al cultivo en un estado de confort hídrico permanente, lo que se traduce directamente en un aumento significativo de los rendimientos productivos. Al estabilizar el potencial hídrico foliar y optimizar la fotosíntesis, no solo se maximiza el volumen de la cosecha, sino que se logra una mejora ostensible en los parámetros de calidad del producto final como calibre, contenido de sólidos disueltos o vida postcosecha, añadiendo un valor comercial diferencial que fortalece la competitividad del productor en el mercado.

3.2.1 Las plantas necesitan un suministro adecuado de agua para llevar a cabo sus funciones fisiológicas vitales, pero tanto la deficiencia como el exceso de agua son perjudiciales para su desarrollo y productividad:

- Estrés Hídrico y Limitación Fotosintética: Cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo del umbral crítico, la planta activa mecanismos de supervivencia, destacando el cierre estomático para minimizar la pérdida por transpiración. Si bien esta respuesta protege la turgencia celular, reduce drásticamente la difusión de (CO2 hacia el mesófilo, limitando severamente la tasa fotosintética y el transporte de solutos por xilema. Un estado de estrés hídrico crónico no solo detiene el crecimiento vegetativo, sino que provoca el aborto de estructuras reproductivas o el llenado deficiente de frutos y granos, resultando en una disminución drástica e irreversible del rendimiento potencial.

- Anoxia Edáfica y Disfunción Metabólica: En el extremo opuesto, el exceso de agua o anegamiento desplaza el aire de los macroporos del suelo, privando a las raíces del oxígeno indispensable para la respiración aeróbica. Esta condición de anoxia interrumpe los procesos metabólicos vitales, forzando a la planta a una glucólisis anaeróbica ineficiente que puede culminar en la muerte de los tejidos radiculares. Como consecuencia, la planta pierde su capacidad de absorción de nutrientes y se vuelve altamente

vulnerable a fitopatógenos oportunistas que proliferan en medios hipóxicos, comprometiendo de forma terminal la sanidad vegetal y la productividad final del sistema (Kirkham, 2014).

3.2.3 La agricultura de precisión faculta al productor para mantener el contenido hídrico del suelo dentro de rangos operativos óptimos, adaptados rigurosamente a cada fase del ciclo fenológico. Esta capacidad de ajuste fino adquiere una relevancia crítica durante las etapas de alta sensibilidad fisiológica, tales como la diferenciación floral, la antesis o el llenado de órganos de reserva. En estos estadios, una disponibilidad hídrica constante y precisa es indispensable para maximizar la partición de asimilados, asegurando el tamaño, el peso específico y la calidad intrínseca del producto cosechado. Para cultivos estratégicos en la economía colombiana, como la papa, el maíz o la caña panelera, la estabilización de la humedad edáfica durante estos periodos críticos es el factor determinante para cerrar la brecha entre el rendimiento real y el potencial genético, garantizando así un producto de calidad superior que cumpla con las exigencias de los mercados competitivos (Fereres & Soriano, 2007).

3.2.4 Un riego preciso y uniforme, especialmente cuando se implementa mediante prescripciones de tasa variable (VRI) que responden a las heterogeneidades del terreno, promueve un desarrollo vegetativo vigoroso y homogéneo en toda la extensión de la parcela. Esta estandarización del crecimiento es un factor determinante para la eficiencia logística, ya que facilita la sincronización de las operaciones de cosecha tanto manuales como mecanizadas y optimiza los protocolos de postcosecha y procesamiento industrial. Al reducir la variabilidad en la madurez y el tamaño del fruto, se minimiza el desperdicio por descarte y se incrementa significativamente la proporción de la cosecha que clasifica en categorías de primera calidad; de este modo, la tecnología de precisión no solo protege el rendimiento volumétrico, sino que maximiza el valor comercial por unidad producida, fortaleciendo la rentabilidad final del agronegocio.

3.2.4 Mejora de atributos de calidad: En muchos cultivos, la gestión hídrica precisa impacta directamente en la calidad del producto final:

- **Frutas y Hortalizas:** Un riego óptimo mejora el tamaño, la firmeza, el contenido de sólidos solubles (azúcares), el sabor y, crucialmente, la vida útil postcosecha. Estos atributos son críticos para la comercialización en mercados de alta exigencia que valoran la calidad.

- **Cultivos de Grano:** Una adecuada disponibilidad hídrica puede influir positivamente en el peso de mil granos, el contenido de proteína o almidón, y la uniformidad de la cosecha, aspectos importantes para la industria de procesamiento.

- **Flores:** Un manejo hídrico óptimo impacta directamente en el tamaño de la flor, la longitud del tallo, la apertura del capullo y la durabilidad en florero, factores que son clave para el valor comercial y la competitividad en el mercado de flores cortadas.

3.2.5 La integración sinérgica de estrategias para evitar el estrés hídrico tanto por déficit como por hipoxia, la optimización en la biodisponibilidad de nutrientes y el mantenimiento de un microclima edáfico ideal, se traduce invariablemente en rendimientos significativamente superiores por unidad de superficie. Aunque la magnitud de este incremento fluctúa según el germoplasma utilizado, las condiciones agroecológicas regionales y la línea base del manejo tradicional, la literatura científica y la evidencia en campo documentan de manera consistente aumentos en la productividad que oscilan entre el 5% y el 25%, con casos excepcionales que superan estos umbrales bajo una gestión de precisión integral (Zhang et al., 2012; Fereres & Soriano, 2007). Este salto cuantitativo no es un evento aislado, sino la consecuencia de estabilizar el metabolismo de la planta, permitiendo que exprese su máximo potencial genético al eliminar las fluctuaciones hídricas que suelen actuar como factores limitantes en la agricultura convencional.

3.3. Beneficios para la sostenibilidad ambiental a largo plazo

Más allá de las ventajas económicas inmediatas, la agricultura de precisión aplicada al riego se consolida como una herramienta de alta eficacia para fomentar la sostenibilidad ambiental a largo plazo. Este enfoque trasciende la rentabilidad privada para convertirse en un imperativo ético y operativo, especialmente en regiones caracterizadas por ecosistemas sensibles o donde la escasez hídrica representa una amenaza creciente para la estabilidad socioeconómica. Al mitigar las externalidades negativas de la agricultura intensiva, la gestión de precisión permite armonizar la producción de alimentos con la conservación del capital natural. Bajo esta premisa de responsabilidad ambiental, es imperativo definir los beneficios clave que articulan este nuevo paradigma de producción sostenible:

- Conservación de Recursos Hídricos y Seguridad Regional: La reducción sustancial del consumo de agua, lograda mediante la aplicación precisa y zonificada, alivia de forma directa la presión antropogénica sobre los acuíferos subterráneos y las cuencas superficiales. Estudios globales en regiones tan diversas como el Valle Central de California, las zonas áridas de Australia y las cuencas tecnificadas de España y América Latina, documentan consistentemente ahorros que oscilan entre el 20% y el 50% en comparación con métodos tradicionales (Fereres & Soriano, 2007). Esta eficiencia no solo protege la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, sino que garantiza la disponibilidad del recurso para otros sectores, mitigando conflictos por el agua en escenarios de escasez.

- Integridad Química del Agua y Mitigación de la Lixiviación: Al controlar con exactitud el frente de humedecimiento, se minimiza la lixiviación de fertilizantes y pesticidas por debajo de la rizosfera, reduciendo drásticamente la carga de nitratos y otros contaminantes en las aguas subterráneas. Esta precisión protege la biodiversidad acuática frente a procesos de eutrofización y asegura

que la calidad del agua se mantenga dentro de los estándares para consumo humano y usos agroindustriales esenciales. En este sentido, la agricultura de precisión actúa como una barrera técnica contra la degradación química de los ecosistemas (Zhang et al., 2012).

- Descarbonización de la Producción y Salud del Suelo: Existe una correlación directa entre el ahorro hídrico y la reducción de la huella de carbono; al bombear volúmenes reducidos, disminuye el consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles, alineando la explotación con los objetivos globales de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2014). Simultáneamente, se promueve la salud edáfica al evitar la anoxia radicular, preservando la actividad de la microbiota beneficioso y manteniendo una estructura física óptima. Esta gestión previene la salinización secundaria al evitar que el exceso de riego eleve la capa freática y concentre sales en la superficie y protege el suelo contra la erosión y la compactación estructural (Kirkham, 2014).

- Resiliencia Agrícola ante la Variabilidad Climática: En un contexto de cambio climático caracterizado por precipitaciones erráticas y olas de calor extremas, la programación de precisión dota al agricultor de una capacidad de respuesta dinámica. Al optimizar cada unidad de agua aplicada, se minimiza el impacto de los periodos de estrés hídrico en la viabilidad del cultivo, permitiendo una adaptación rápida a las fluctuaciones ambientales. De este modo, la tecnología trasciende la eficiencia puntual para convertirse en la base de la estabilidad productiva y la sostenibilidad de los recursos hídricos a largo plazo, garantizando que la agricultura siga siendo una actividad viable bajo la incertidumbre climática del siglo XXI.

La optimización del riego mediante la agricultura de precisión no se configura como una tendencia efímera, sino como una transformación

estructural e indispensable para la agricultura contemporánea. La integración sinérgica de sensores de humedad edáfica, estaciones meteorológicas automáticas, teledetección de vanguardia y sistemas de tasa variable (VRI), confiere a los profesionales del sector una capacidad sin precedentes para gestionar el recurso hídrico con precisión milimétrica. Esta metodología sustituye la intuición empírica por un rigor científico sustentado en modelos de balance hídrico y umbrales dinámicos, asegurando que cada unidad de volumen de agua se aplique en el momento óptimo y la ubicación geográfica exacta (Allen et al., 1998; Jones, 2004).

Los beneficios de esta evolución tecnológica son profundos y multifacéticos:

- Sostenibilidad y Resiliencia: El ahorro sustancial de agua que oscila entre el 20% y el 50% trasciende la victoria económica individual del agricultor para convertirse en un imperativo ambiental ineludible. En un contexto de volatilidad climática y presión hídrica creciente, esta eficiencia emerge como el pilar fundamental de la seguridad alimentaria regional (Fereres & Soriano, 2007; Zhang et al., 2012).

- Optimización Fisiológica y Valor Comercial: Al estabilizar las condiciones del suelo y evitar tanto el estrés por déficit como la anoxia por exceso, se garantiza el desarrollo integral del cultivo en sus fases fenológicas críticas. Esto no solo maximiza el rendimiento por superficie, sino que realza atributos de calidad como el calibre, la firmeza y el contenido de sólidos solubles, incrementando la competitividad en mercados de exportación exigentes (Kirkham, 2014).

- Eficiencia en Insumos: La mitigación de la lixiviación de nutrientes optimiza el aprovechamiento de fertilizantes, reduciendo costos operativos y minimizando la contaminación por nitratos y fosfatos en cuerpos de agua.

En esencia, la agricultura de precisión dota al productor de la capacidad de operar con una eficiencia superior y una rentabilidad robusta, siendo intrínsecamente más sostenible. Adoptar estas prácticas no es una simple opción estratégica, sino una inversión fundamental en el futuro de la producción agrícola. Representa el sendero hacia una agricultura inteligente y resiliente, capaz de enfrentar el desafío de alimentar a una población creciente en un planeta de recursos finitos, garantizando la viabilidad de las explotaciones para las generaciones venideras.

Paso a paso de aplicación de riego de precisión en un sistema agroforestal de cacao (trópico húmedo)

Contexto productivo y biofísico

Finca: 15 ha de cacao bajo sistema agroforestal (sombra parcial), en zona tropical húmeda. Condiciones del terreno: pendiente moderada; variabilidad edáfica (cambios de textura dentro del lote). Sistema de riego existente: presurizado, con aplicación uniforme en toda la finca.

Implicación agronómica clave: en texturas distintas, el suelo retiene y libera agua de forma diferente; por eso regar igual en todas las zonas genera déficit en unas y exceso en otras

Problema

Se evidencia pérdida de rendimiento y heterogeneidad en el desarrollo del cultivo por riego uniforme, sin considerar zonas con diferente textura (y, por tanto, diferente capacidad de almacenamiento de agua).

Objetivo técnico del caso

Implementar una programación de riego sitio-específica combinando:

- Monitoreo del agua en el suelo (sensores TDR).
- Demanda atmosférica y del cultivo (ETc vía estación meteorológica).

- Zonificación por textura.
- Aplicación diferenciada mediante VRI en sistema presurizado.

Intervención paso a paso

Paso 1. Zonificación edáfica: mapa de textura

1. Se realiza un muestreo/levantamiento de textura y se genera un mapa de textura para zonas arenosas vs franco-arcillosas).
2. Con el mapa se definen unidades de manejo (Z1, Z2, Z3) para riego.
3. Salida esperada: "Zonas de manejo hídrico" basadas en la variabilidad espacial.

Paso 2. Instalación y lectura de sensores TDR

Se instalan **sensores TDR a 20 y 40 cm** de profundidad en puntos representativos de cada zona de textura:

- **20 cm:** capa más dinámica (evaporación + raíces finas).
- **40 cm:** confirma si el agua llega a la zona radicular profunda o si hay percolación.
- **Se obtiene el** contenido volumétrico de agua y su dinámica por zona.

Paso 3. Cálculo de ETc con estación meteorológica

Se instala una Estación Meteorológica Automática (EMA) para registrar variables (temperatura, HR, radiación, viento, precipitación) que permiten calcular la demanda hídrica.

Cálculo operativo:

- Se calcula ET_0 (base climática) y luego ETc del cacao.
- El ETc puede ajustarse con coeficientes como Kc y factores asociados a condiciones del sistema para mejorar precisión operativa.

Paso 4. Programación con balance hídrico por zona

Se usa el modelo de balance hídrico del suelo para decidir "cuándo" y "cuánto" regar, integrando:

- Entradas: precipitación + riego
- Salidas: ETc + drenaje profundo + escorrentía
- Resultado: cambio de almacenamiento (ΔS).

Regla práctica para el estudiante:

Si el TDR muestra que el perfil en 20–40 cm cae por debajo del umbral definido para cada textura → **activar riego.**

Si el sensor a 40 cm sube demasiado después del riego → ajustar lámina porque puede haber **percolación/lixiviación.**

Paso 5. Implementación de VRI para el riego de tasa variable

Con las zonas (textura + humedad + ETc) se construye un mapa de prescripción y se integra a un sistema VRI, que aplica diferentes láminas dentro del mismo lote.

Resultado operativo:

- Zonas de mayor retención → menor lámina / mayor intervalo.

- Zonas de menor retención → menor intervalo / ajuste de duración, evitando estrés.

Indicadores

Tras la implementación se reporta:

- Reducción del 22% en consumo de agua.
- Incremento del 12% en rendimiento.
- Disminución de enfermedades radiculares.

Interpretación agronómica (conexión causa–efecto): menos exceso de humedad reduce condiciones predisponentes para problemas radiculares, y evitar déficit reduce estrés hídrico y estabiliza la fisiología del cultivo.

Ejercicio aplicado

1. Contexto del predio

- Área: 15 ha (cacao bajo sombra parcial, sistema agroforestal).
- Pendiente: 6–12% (moderada).
- Riego existente: presurizado (goteo/aspersión localizada), antes con lámina uniforme.
- Profundidad efectiva de raíces (Zr): 0,60 m.
- Eficiencia de aplicación (Ea): 0,85.
- Periodo de análisis (época seca): 120 días.

2. Zonificación edáfica en el mapa de textura y parámetros hídricos

Se obtienen 3 zonas de manejo (ZM) por textura:

Zona	Z1	Z2	Z3
Área (ha)	5	6	4
Textura	Franco arenosa	Franca	Franco arcillosa
Capacidad de campo θFC (m^3/m^3)	0,23	0,3	0,36
PMP θPMP (m^3/m^3)	0,1	0,14	0,18
Agua disponible TAW (mm)	(0,13×0,60×1000)=78	(0,16×0,60×1000)=96	(0,18×0,60×1000)=108
Umbral RAW (p=0,5) (mm)	39	48	54

Interpretación: Z1 almacena menos agua ⇒ se debe regar con menor intervalo; Z3 almacena más ⇒ se puede espaciar más y evitar exceso.

3. Instrumentación: sensores TDR

- Instalación: 2 sensores por zona (puntos representativos), a 20 cm y 40 cm.
- Variable: contenido volumétrico de agua (θ, m^3/m^3).
- Promedio por zona (se usa el promedio de sus puntos como lectura operativa).

4. ET_o y ETc (estación meteorológica)

Semana típica de época seca (7 días). *Kc cacao agroforestal (cobertura alta, sombra parcial): 0,95 (valor operativo para el ejercicio). * ETc = ET_o × Kc

Día	ET_o (mm/d)	ETc (mm/d) = ET_o×0,95	Lluvia (mm/d)
1	4,2	3,99	0
2	4	3,8	0
3	3,8	3,61	0
4	4,1	3,9	5
5	4,3	4,09	0
6	4,2	3,99	0
7	4	3,8	0

5. Lecturas TDR y diagnóstico (día 5, antes de regar)

Para convertir a "agua almacenada" en el perfil 0–40 cm, se aproxima el promedio del perfil como:

$$\theta_{0-40} \approx 0{,}6(\theta_{20}) + 0{,}4(\theta_{40})$$

Lecturas promedio por zona (día 5 – 6:00 am)

Zona	θ_{20}	θ_{40}	$\theta_{0-40\ estimada}$	Diagnóstico
Z1	0,15	0,16	0,154	Cerca del umbral (déficit rápido)
Z2	0,19	0,21	0,198	Déficit moderado
Z3	0,28	0,3	0,288	Aún con buena reserva

Umbral de riego por zona (en θ) para el perfil 0–60 cm

Se define el umbral cuando se consume RAW (50% de TAW):

$$\theta_{\text{umbral}} = \theta_{\text{FC}} - \frac{RAW}{Z_r \times 1000}$$

- Z1: θumbral = 0,23 – (39/(0,60×1000)) = 0,23 – 0,065 = **0,165**
- Z2: θumbral = 0,30 – (48/600) = 0,30 – 0,080 = **0,220**
- Z3: θumbral = 0,36 – (54/600) = 0,36 – 0,090 = **0,270**

Comparación (día 5):

- Z1: θ0–40=0,154 < 0,165 ⇒ regar
- Z2: θ0–40=0,198 < 0,220 ⇒ regar
- Z3: θ0–40=0,288 > 0,270 ⇒ NO regar (alto riesgo de exceso si se riega)

6. Prescripción VRI (día 5)

Se aplica una lámina **neta** para reponer agua sin saturar (objetivo: acercarse a θFC en 0–60 cm). Se decide reponer:

Z1: **18 mm netos**

Z2: **15 mm netos**

Z3: **0 mm netos**

Conversión a lámina **bruta** por eficiencia (Ea=0,85):

$$\text{L}_{\text{bruta}} = \frac{Lneta}{0{,}85}$$

Zona	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
Z1	18	21,18
Z2	15	17,65
Z3	0	0

Volumen aplicado (1 mm·ha = 10 m³):

- Z1: 21,18 mm × 5 ha × 10 = **1.059 m³**
- Z2: 17,65 mm × 6 ha × 10 = **1.059 m³**
- Z3: 0 mm × 4 ha × 10 = **0 m³**

Total, día 5 con VRI: 2.118 m³

7. Comparación contra riego uniforme

Antes, el agricultor aplicaba **18 mm brutos a toda la finca** sin zonificación.

- Uniforme: 18 mm × 15 ha × 10 = **2.700 m³** (día 5)
- VRI: **2.118 m³** (día 5)

Ahorro: 2.700 − 2.118 = **582 m³** (21,6%)

8. Resultados de temporada (120 días) con números exactos

Consumo de agua

Escenario A: riego uniforme (antes)

- Lámina promedio bruta diaria: **6,0 mm/d**
- Total temporada: 6,0 × 120 = **720 mm**

- Volumen: 720 mm × 15 ha × 10 = **108.000 m³**

Escenario B: riego con VRI (después)

- Lámina promedio bruta diária (ponderada por zonas): **4,68 mm/d**
- Total temporada: 4,68 × 120 = **561,6 mm**
- Volumen: 561,6 × 15 × 10 = **84.240 m³**

Reducción exacta: 108.000 − 84.240 = **23.760 m³**

Porcentaje: 23.760 / 108.000 = **22%**

Rendimiento

Antes (uniforme): 1,25 t/ha de cacao seco

Producción total: 1,25 × 15 = **18,75 t**

Después (VRI): +12% 1,25 × 1,12 = **1,40 t/ha**

Producción total: 1,40 × 15 = **21,00 t**

Incremento exacto: 21,00 − 18,75 = **2,25 t** (12%)

Enfermedades radiculares

Se mide incidencia de plantas con síntomas compatibles con complejos radiculares (asfixia + patógenos oportunistas) en transectos:

- **Antes:** 9,5% de plantas con síntomas (promedio de finca)
- **Después:** 5,8%

Reducción absoluta: 3,7 puntos porcentuales

Reducción relativa: 3,7 / 9,5 = 38,9%

Al reducir el exceso de humedad en Z3 (zona arcillosa) y evitar saturación, disminuye predisposición a problemas radiculares; y al reducir déficit en Z1, mejora vigor y resiliencia.

Síntesis final

La optimización del riego en sistemas productivos modernos ya no puede fundamentarse en esquemas uniformes ni en decisiones empíricas aisladas. Este capítulo demostró que la gestión eficiente del agua requiere una comprensión integral del **sistema suelo–planta–atmósfera (SPA)**, donde el flujo hídrico está gobernado por gradientes de potencial y condicionado por la textura del suelo, la fisiología del cultivo y la demanda atmosférica.

Uno de los pilares conceptuales desarrollados fue la evapotranspiración (ET_o y ETc) como indicador cuantitativo de la demanda hídrica. La estimación de ET_o mediante modelos robustos y su ajuste a través del coeficiente de cultivo (Kc) permiten transformar información meteorológica en decisiones agronómicas concretas. Sin embargo, el capítulo enfatiza que la programación del riego no debe depender únicamente de la demanda atmosférica, sino integrarse con el estado real del suelo medido mediante sensores.

El uso de **tecnologías de monitoreo**, como la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y la tensiometría, permite cuantificar en tiempo real la disponibilidad de agua en el perfil radicular. Esta información, combinada con modelos de balance hídrico, facilita determinar con precisión cuándo y cuánto regar, evitando tanto el déficit hídrico como el exceso de humedad, ambos perjudiciales para el rendimiento y la sanidad del cultivo.

El capítulo también abordó la importancia de la **variabilidad espacial**, demostrando que los lotes agrícolas no son homogéneos. Diferencias en textura, pendiente y estructura del suelo generan comportamientos hídricos distintos dentro de una misma finca. Ignorar esta heterogeneidad conduce a ineficiencias técnicas, económicas y ambientales. En este contexto, la implementación del **riego de tasa variable (VRI)** emerge como una herramienta estratégica que permite aplicar láminas diferenciadas según zonas de manejo, optimizando el uso del recurso hídrico.

Desde el punto de vista fisiológico, se analizó el impacto del **estrés hídrico** sobre el cultivo: cierre estomático, reducción fotosintética, menor crecimiento y afectación del rendimiento. Paralelamente, se explicó cómo el exceso de agua favorece procesos como la lixiviación de nutrientes y la salinización, además de incrementar la incidencia de enfermedades radiculares. Por tanto, el riego optimizado no solo incrementa la productividad, sino que mejora la salud del sistema suelo–planta.

En términos cuantitativos, el capítulo evidenció que la integración de sensores, modelos climáticos y tecnologías VRI puede generar:

- Reducciones significativas en el consumo de agua.
- Incrementos en el rendimiento del cultivo.
- Mayor eficiencia en el uso del agua (EUA).
- Disminución de riesgos ambientales asociados a drenaje profundo y pérdida de nutrientes.

Finalmente, el capítulo consolida una visión estratégica: la optimización del riego no es únicamente una mejora técnica, sino una transición hacia sistemas productivos **más resilientes, sostenibles y económicamente rentables**. En escenarios de cambio climático y creciente presión sobre los recursos hídricos, la agricultura de precisión aplicada al riego se convierte

en una herramienta fundamental para garantizar seguridad alimentaria, sostenibilidad ambiental y competitividad del sector agropecuario.

Ejercicios prácticos y de discusión

a. Diseñe un esquema de monitoreo hídrico para una finca de 10 ha en clima semiárido.

b. Compare tensiómetros vs sensores capacitivos en términos de precisión y costo.

c. Analice los riesgos de sobre-irrigación en suelos franco-arcillosos.

d. ¿Cómo integraría IA para anticipar estrés hídrico?

e. Elabore un balance hídrico simplificado.

f. Evalúe el impacto económico del ahorro del 15% en agua en un cultivo de maíz.

g. Discuta las barreras culturales para adoptar riego de precisión.

h. Diseñe una estrategia de capacitación para pequeños productores.

Ejercicio 1: Diseño de un sistema de monitoreo de riego para un cultivo específico

Contexto: Imagina que eres un ingeniero agrónomo consultor y un agricultor en la región de Nariño (Colombia) que cultiva **papa (solanum tuberosum)** en una finca de 10 hectáreas te ha contratado para optimizar su riego. Actualmente, riega de forma tradicional, observando el suelo y con base en su experiencia.

Tarea:

1. **Propón un conjunto de tecnologías** para el monitoreo del agua y la programación del riego que considerarías esenciales para esta finca. Justifica tu elección para cada tecnología (sensores de suelo, estación meteorológica, teledetección, etc.), considerando las particularidades del cultivo de papa y el clima de Nariño.

2. **Describe cómo integrarías los datos** de estas tecnologías para tomar decisiones de riego. ¿Qué parámetros priorizarías para la programación del riego diario o semanal?

3. **Discute los posibles desafíos** en la implementación de estas tecnologías en una finca típica de Nariño y cómo los abordarías.

Preguntas de Discusión:

- ¿Qué tipo de sensor de humedad del suelo sería más adecuado para los suelos volcánicos de Nariño y por qué?

- ¿Cómo influiría la topografía irregular de algunas zonas de Nariño en la selección y disposición de las tecnologías?

- ¿Qué rol jugaría la disponibilidad de conectividad (internet, señal móvil) en la viabilidad de tu propuesta?

Ejercicio 2: Análisis de un escenario de estrés hídrico basado en datos

Contexto: Se te presentan los siguientes datos hipotéticos de una parcela de **maíz (Zea mays)** durante una semana, donde el agricultor no regó:

- **Humedad del Suelo (sensor a 30 cm):**
    - Día 1: 65% de Capacidad de Campo (CC)

- Día 3: 45% de CC
- Día 5: 30% de CC

- Día 7: 20% de CC (Punto de Marchitez Permanente para el maíz en este suelo ~15% de CC)
- **ETc (Evapotranspiración del Cultivo) promedio diario:** 5 mm/día.
- **Precipitación:** 0 mm en toda la semana.
- **Fase fenológica del maíz:** Llenado de grano (etapa crítica).
- **Umbral de riego deseado:** No bajar del 50% de la CC.

Tarea:

1. **Analiza los datos:** Describe el estado hídrico del cultivo a lo largo de la semana.
2. **Calcula:** Si el riego se hubiera activado al alcanzar el umbral deseado del 50% de CC, ¿cuántos días después del Día 1 se debería haber regado? (Asume una pérdida de agua constante por ETc y sin otras entradas/salidas).
3. **Cuantifica el déficit:** ¿Cuántos milímetros de agua le "faltaron" al cultivo al final de la semana (Día 7) en comparación con lo que hubiera sido óptimo (mantenerse sobre el 50% de CC)? Asume que la Capacidad de Campo total de la zona radicular es de 150 mm.
4. **Discute las consecuencias:** ¿Qué implicaciones agronómicas (rendimiento, calidad) podría tener este estrés hídrico para el cultivo de maíz en etapa de llenado de grano?

Preguntas de Discusión:

- ¿Qué tecnologías habrían alertado al agricultor sobre esta situación de estrés?
- ¿Cómo podría un sistema de riego de tasa variable haber mitigado este problema si la parcela tuviera diferentes tipos de suelo?
- ¿Qué otros factores (temperatura, radiación solar) podrían haber influido en la tasa real de ETc y cómo se considerarían en un modelo más preciso?

Ejercicio 3: Evaluación costo-beneficio de la adopción de la agricultura de precisión en riego

Contexto: Un pequeño agricultor está considerando invertir en tecnología de agricultura de precisión para el riego de su cultivo de **hortalizas (ej. lechugas o brócoli)** en un invernadero de 0.5 hectáreas. La inversión inicial estimada para sensores, controlador y software es de ($5,000 USD o 20,000,000 millones de pesos colombianos). Se espera un ahorro del 30% en agua y energía, y un aumento del 10% en el rendimiento y la calidad.

Tarea:

1. **Identifica los principales costos y beneficios** (económicos y no económicos) que el agricultor debería considerar al tomar esta decisión de inversión.
2. **Desarrolla un argumento de venta** convincente para el agricultor, destacando los beneficios a largo plazo más allá de la recuperación de la inversión inicial.
3. **Analiza los riesgos** asociados con esta inversión y propón estrategias para mitigarlos.

Preguntas de discusión:

- ¿Cómo se podría cuantificar el «valor de la calidad» de las hortalizas mejoradas en el mercado local de Pasto?

- ¿Qué papel juega la capacitación y el soporte técnico en el éxito de la implementación de estas tecnologías?

- ¿Consideras que el tamaño de la finca (0,5 ha) justifica la inversión en tecnologías de precisión? ¿Por qué sí o por qué no?

Ejercicio 4: Adaptación al cambio climático con riego de precisión

Contexto: La región del Huila, como muchas otras, enfrenta la incertidumbre del cambio climático, con patrones de lluvia más erráticos, sequías más prolongadas y eventos de lluvia intensa.

Tarea:

1. Explica cómo la agricultura de precisión en el riego puede aumentar la resiliencia de las explotaciones agrícolas frente a los desafíos del cambio climático (sequías, olas de calor, lluvias torrenciales).

2. Describe un escenario futuro (ej. una sequía severa imprevista) y cómo un sistema de riego de precisión permitiría a un agricultor en Nariño gestionar mejor esta crisis en comparación con un método de riego convencional.

3. Discute las implicaciones a nivel regional de una adopción generalizada de estas tecnologías para la gestión del recurso hídrico en el Huila – Colombia.

4. Explica cómo la agricultura de precisión en el riego puede aumentar la resiliencia de las explotaciones agrícolas frente a los desafíos del cambio climático (sequías, olas de calor, lluvias torrenciales).

5. Describe un escenario futuro (ej. una sequía severa imprevista) y cómo un sistema de riego de precisión permitiría a un agricultor en Nariño gestionar mejor esta crisis en comparación con un método de riego convencional.

6. Discute las implicaciones a nivel regional de una adopción generalizada de estas tecnologías para la gestión del recurso hídrico en el Huila – Colombia.

Preguntas de Discusión:

- ¿Qué datos climáticos (además de los históricos) serían más útiles para la toma de decisiones de riego en un escenario de cambio climático?

- ¿Podría la agricultura de precisión contribuir a la seguridad alimentaria en el Huila bajo condiciones climáticas adversas?

- ¿Qué políticas o incentivos gubernamentales podrían fomentar la adopción de estas tecnologías en la región?

Referencias

AGAP. (2025). *Ferreyros distribuirá equipos de riego por pivote "Valley".* https://agapperu.org/noticias/ferreyros-distribuira-equipos-de-riego-por-pivote-valley/

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

Baluja, J., Diago, M. P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., & Tardáguila, J. (2012). Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation*

Science, 30(6), 511–522. https://doi.org/10.1007/s00271-012-0382-9

Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1998). *An introduction to environmental biophysics* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1

Evans, R. G., LaRue, J., Stone, K. C., & King, B. A. (2013). Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. *Irrigation Science,* 31(4), 871–887. https://doi.org/10.1007/s00271-012-0365-x

Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research,* 44(7), W00E04. https://doi.org/10.1029/2007WR006200

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany,* 58(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

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

González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016). Drones aplicados a la agricultura de precisión. *Publicaciones e Investigación,* 10, 23–37. https://doi.org/10.22490/25394088.1585

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

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014: *Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core

Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Eds.). https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

Irmak, S., Kabenge, I., Rudnick, D. R., Knezevic, S. Z., Woodward, D. E., & Moravek, M. (2016). Evapotranspiration crop coefficients for mixed riparian plant community and transpiration crop coefficients for common reed and cottonwood species. *Journal of Hydrology,* 537, 261–273. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.051

Jiménez, A., Velásquez, F., & Puente, S. (2023). Sistema inteligente de prescripción de riego agrícola basado en redes de sensores y modelado de cultivos. *Visión Electrónica,* 17(1), 51–61. https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/18957

Jones, H. G. (1999). Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment,* 22(9), 1043–1055. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00468.x

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

Kirkham, M. B. (2014). *Principles of soil and plant water relations* (2nd ed.). Academic Press.

Martínez-Casasnovas, J. A., Arnó, J., Escolà, A., & Sandonís-Pozo, L. (2025). Variable-rate nitrogen application in rainfed barley: A drought-year case study. *Nitrogen,* 6(4), Article 118. https://doi.org/10.3390/nitrogen6040118

Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). Principles of environmental physics: *Plants, animals, and the atmosphere* (4th ed.). Academic Press.

O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Andrade, M. A., Workneh, F., Price, J. A., & Rush, C. M. (2016). Site-specific variable-rate irrigation as a means to enhance water use efficiency. *Transactions of the ASABE,* 59(1), 239–249. https://doi.org/10.13031/trans.59.11165

Sadler, E. J., Evans, R. G., Stone, K. C., & Camp, C. R. (2005). Opportunities for conservation with precision irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation,* 60(6), 371–378.

Top Ten. (2025). *Riego por goteo.* https://topten.pe/riego-por-goteo/

Universidad Agrícola. (2018, enero 3). *Riego de precisión: ¿Cuánta agua necesitan los cultivos?* https://universidadagricola.com/riego-de-precision-cuanta-agua-necesitan-los-cultivos/

Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. J. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment,* 117, 322–337. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007

Zhang, Y., Kendy, E., Qiang, Y., Liu, C., Shen, Y., & Sun, H. (2012). Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management, 64*(2), 107–122.

Capítulo 2

Monitoreo del Rendimiento y Evaluación de Resultados



Objetivos de aprendizaje

1. Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

2. Comprender la arquitectura de un sistema IoT agrícola aplicado al monitoreo productivo.

3. Diferenciar tipos de sensores utilizados en agricultura de precisión.

4. Integrar datos edáficos, climáticos y fisiológicos en plataformas Big data.

5. Interpretar flujos de datos en tiempo real para toma de decisiones agronómicas.

6. Diseñar un esquema básico de monitoreo inteligente para un sistema agroforestal.

Conceptos clave

- Internet de las Cosas (IoT): es una arquitectura tecnológica que permite la conexión e intercomunicación de dispositivos físicos inteligentes (sensores, actuadores, estaciones meteorológicas, maquinaria agrícola, drones, etc.) a través de redes digitales para capturar, transmitir, procesar y analizar datos en tiempo real. En agricultura de precisión, el IoT constituye la columna vertebral del monitoreo continuo del sistema suelo–planta–atmósfera, permitiendo:

    - Medición automática de variables edáficas (humedad, temperatura, CE).

    - Monitoreo climático en tiempo real.

- Control automatizado de riego y fertirriego.
- Seguimiento fisiológico del cultivo.

Un sistema IoT agrícola se compone de:

1. Sensores (captura de datos).
2. Redes de comunicación.
3. Plataforma de almacenamiento y análisis.
4. Sistema de soporte para la toma de decisiones.

- Sensores remotos y proximales
  - Sensores remotos: Son dispositivos que capturan información sin contacto físico directo con el objeto o cultivo, generalmente instalados en:
    - Satélites
    - Drones
    - Aeronaves
    - Torres de monitoreo

Permiten medir variables como:

- NDVI
- Temperatura de dosel
- Índices de estrés hídrico
- Biomasa estimada

Se basan en la reflectancia espectral y radiación electromagnética.

- ◇ Sensores proximales: Son sensores instalados directamente en el campo o en contacto cercano con el cultivo o el suelo. Ejemplos:

- ► TDR para humedad del suelo
- ► Sensores de CE aparente
- ► SPAD para clorofila
- ► Sensores de flujo de savia

Su principal ventaja es la alta precisión local y monitoreo continuo.

- Redes LPWAN (LoRa, NB-IoT): Las LPWAN (Low Power Wide Area Networks) son redes de comunicación inalámbrica diseñadas para transmitir pequeñas cantidades de datos a larga distancia con bajo consumo energético. Son fundamentales en zonas rurales con limitada conectividad.

- ◇ LoRa (Long Range)

- ► Opera en bandas no licenciadas.
- ► Bajo consumo energético.
- ► Alcance de 5–15 km en zonas rurales.
- ► Ideal para fincas extensivas.

- ◇ NB-IoT (Narrowband IoT)

- ► Opera sobre redes celulares.
- ► Mayor estabilidad.

- Alta penetración en zonas con cobertura móvil.
- Seguridad mejorada.

En agricultura permiten:

- Transmisión de datos de sensores cada 15–60 minutos.
- Operación con baterías durante varios años.

- Big data agrícola: El Big data agrícola es el procesamiento y análisis masivo de grandes volúmenes de datos heterogéneos provenientes de múltiples fuentes productivas. Se caracteriza por las 5V:
  - Volumen: gran cantidad de datos.
  - Velocidad: datos en tiempo real.
  - Variedad: datos climáticos, edáficos, fisiológicos.
  - Veracidad: calidad y confiabilidad.
  - Valor: generación de decisiones estratégicas.

  Aplicaciones:
  - Predicción de rendimiento.
  - Modelos de riesgo fitosanitario.
  - Agricultura prescriptiva.
  - Zonificación productiva inteligente.
- Machine Learning aplicado al agro: El Machine Learning (Aprendizaje automático) es una rama de la inteligencia artificial que

permite que los sistemas aprendan patrones a partir de datos históricos sin programación explícita para cada caso. En agricultura se utiliza para:

- ◇ Predicción de enfermedades.
- ◇ Estimación de rendimiento.
- ◇ Clasificación de suelos.
- ◇ Detección automática de malezas.
- ◇ Modelos de estrés hídrico.

Algoritmos comunes:

- ◇ Random Forest
- ◇ Redes neuronales
- ◇ Support Vector Machines
- ◇ Regresión múltiple avanzada

Permite pasar de análisis descriptivo a análisis predictivo y prescriptivo.

- Agricultura digital: La agricultura digital es el enfoque integral que combina tecnologías digitales (IoT, SIG, Big data, inteligencia artificial, robótica y automatización) para mejorar la eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental y rentabilidad económica del sistema agrícola. No se limita a sensores; implica:
  - ◇ Digitalización de procesos.
  - ◇ Trazabilidad productiva.

- Automatización de decisiones.
- Integración de datos históricos y en tiempo real.

Representa la evolución de la agricultura de precisión hacia un sistema inteligente interconectado.

- Plataformas SIG integradas: Las Plataformas SIG integradas son sistemas que permiten almacenar, analizar y visualizar datos georreferenciados provenientes de múltiples fuentes (sensores, drones, estaciones climáticas, análisis de suelo). Permiten:
  - Mapas de variabilidad espacial.
  - Mapas de prescripción.
  - Modelación espacial del carbono.
  - Identificación de zonas de riesgo fitosanitario.

Cuando están integradas con IoT y Big data, permiten decisiones espaciales en tiempo real.

- Edge Computing: El Edge Computing es un modelo de procesamiento de datos donde el análisis se realiza cerca del lugar donde se generan los datos (en el "borde" de la red), en lugar de enviarlos primero a la nube. Ventajas en agricultura:
  - Reducción de latencia.
  - Menor dependencia de internet.
  - Respuesta inmediata en sistemas automatizados.
  - Mayor seguridad de datos.

Ejemplo:

Un sistema de riego que activa válvulas automáticamente cuando el sensor detecta humedad crítica, sin necesidad de enviar datos a la nube.

- Nube agrícola (Cloud Farming): La Nube agrícola es el uso de infraestructuras de computación en la nube para almacenar, procesar y analizar datos agrícolas. Permite:
  - Acceso remoto a datos productivos.
  - Escalabilidad de almacenamiento.
  - Integración de múltiples fincas.
  - Modelos predictivos de gran escala.

Es fundamental para agricultura empresarial, cooperativas y análisis regionales.

- Interoperabilidad de datos: La interoperabilidad de datos es la capacidad de diferentes sistemas, dispositivos y plataformas digitales de intercambiar información de manera estandarizada, coherente y funcional. En agricultura es crucial porque:
  - Sensores de distintas marcas deben integrarse.
  - Plataformas SIG deben comunicarse con sistemas de riego.
  - Maquinaria debe recibir mapas de prescripción.

Sin interoperabilidad, la digitalización se fragmenta y pierde eficiencia

Desarrollo técnico

Monitoreo del rendimiento y evaluación de resultados

El panorama de la agricultura moderna se sitúa en una encrucijada crítica, caracterizada por la creciente demanda global de alimentos, la intensificación de la presión antrópica y climática sobre recursos naturales limitados y la marcada variabilidad de los patrones meteorológicos. Este contexto complejo exige sistemas de producción agrícola inherentemente más eficientes y sostenibles, capaces de responder simultáneamente a desafíos productivos, económicos y ambientales. En este escenario, la agricultura de precisión emerge como una estrategia indispensable, al transformar el manejo agrícola desde un enfoque predominantemente empírico, basado en la experiencia, hacia una ciencia rigurosa y sistemática sustentada en el análisis de datos cuantificables y espacialmente explícitos (Pierce & Nowak, 1999). Sin embargo, la adopción de tecnologías avanzadas como la siembra a tasa variable o la aplicación diferenciada de insumos representa solo una parte del enfoque integral, ya que el verdadero valor y la sostenibilidad de estas innovaciones dependen de la capacidad de monitorear el rendimiento de manera rigurosa y de evaluar objetivamente los resultados de las intervenciones agronómicas implementadas (Gebbers & Adamchuk, 2010).

En este sentido, el presente capítulo se adentra en la metodología y las herramientas fundamentales que permiten un monitoreo y una evaluación exhaustiva dentro del marco de la agricultura de precisión. Se abordan aspectos que van desde la instrumentación y calibración de los monitores de rendimiento integrados en las cosechadoras, hasta la interpretación crítica de los datos georreferenciados generados durante la cosecha. Asimismo, se analiza el potencial analítico y predictivo de la teledetección mediante el uso de índices de vegetación, así como el papel clave de los sensores de suelo en la caracterización de la heterogeneidad edáfica (Zhang et al., 2012). Se enfatiza especialmente en cómo la integración sistemática de estas fuentes de información, a través de plataformas de SIG y técnicas

avanzadas de análisis espacial y temporal, permite comprender la compleja variabilidad intra-parcelaria del rendimiento agrícola. Esta comprensión detallada no solo facilita la identificación de zonas con alto potencial productivo o con limitaciones específicas, sino que también permite validar de manera empírica la eficacia y la rentabilidad de las estrategias de manejo diferenciado implementadas en el campo (Mulla, 2013).

El objetivo central de este capítulo es dotar a los profesionales del sector agropecuario y a los estudiantes universitarios de disciplinas afines con los fundamentos teóricos y las competencias prácticas necesarias para transformar datos brutos en información accionable y estratégicamente valiosa. El dominio de herramientas para correlacionar el rendimiento con atributos edáficos y climáticos, junto con la capacidad de cuantificar el retorno de la inversión (ROI) asociado a las prácticas de agricultura de precisión, fortalece significativamente los procesos de toma de decisiones agronómicas y de gestión predial. En este contexto, el monitoreo del rendimiento no se limita a indicar cuánto se produjo, sino que permite comprender con mayor profundidad dónde y por qué se obtuvieron determinados resultados en cada subzona del lote agrícola. Esta información detallada constituye un insumo clave para identificar patrones productivos, evaluar la eficacia de las aplicaciones variables, optimizar decisiones futuras de manejo, justificar económicamente las inversiones realizadas y validar modelos agronómicos predictivos. De este modo, un monitoreo y una evaluación efectivos se consolidan como el puente indispensable entre los principios conceptuales de la agricultura de precisión y su aplicación práctica, garantizando sistemas productivos más eficientes, rentables y ambientalmente responsables a largo plazo (Scharf et al., 2002).

1. Herramientas y tecnologías para el monitoreo del rendimiento

En la era de la agricultura de precisión (AP), el monitoreo del rendimiento ha experimentado una transformación sustancial, pasando de ser una estimación global del volumen cosechado a convertirse en un proceso analítico, preciso y espacialmente diferenciado. En la actualidad,

ya no resulta suficiente conocer la producción total de un lote; el verdadero valor agronómico radica en comprender con exactitud dónde se obtuvieron determinados resultados productivos y cuáles fueron las causas subyacentes de la variabilidad espacial observada dentro del sistema agrícola (Adamchuk et al., 2004). Este cambio de paradigma ha sido posible gracias al desarrollo y la adopción de tecnologías capaces de capturar información detallada, georreferenciada y en tiempo real, permitiendo una lectura mucho más fina del comportamiento productivo de los cultivos.

En este contexto, la presente sección se orienta a explorar las principales herramientas y tecnologías que permiten a los profesionales del agro capturar, procesar y visualizar datos de rendimiento con un nivel de precisión sin precedentes. Se analizan desde los monitores de rendimiento integrados en las cosechadoras modernas considerados el núcleo operativo del monitoreo productivo hasta el aporte complementario de los sensores remotos, como drones y satélites, y la información crítica proporcionada por los sensores de suelo. En conjunto, estas tecnologías posibilitan la construcción de mapas de rendimiento detallados y espacialmente explícitos, fundamentales para interpretar la variabilidad intra-parcelaria. No obstante, para que esta información se traduzca efectivamente en decisiones agronómicas acertadas, resulta indispensable una correcta implementación y calibración de los equipos, así como una comprensión clara de sus capacidades, alcances y limitaciones. Solo de esta manera la variabilidad natural del campo puede convertirse en una oportunidad concreta para la optimización continua de los sistemas productivos.

1.1 Monitores de rendimiento en cosechadoras

Los monitores de rendimiento instalados en las cosechadoras constituyen la piedra angular del monitoreo productivo dentro del enfoque de la agricultura de precisión. Desde su desarrollo inicial y posterior adopción a gran escala, estos sistemas han revolucionado la forma en que los productores y técnicos comprenden la variabilidad espacial inherente de los cultivos (Grisso et al., 2014). Su principal aporte radica en la transición desde

una visión promedio y homogénea del lote hacia una cartografía detallada del rendimiento, en la que cada punto del campo queda representado con información cuantitativa y georreferenciada.

Estos sistemas no solo registran la cantidad de grano o biomasa cosechada, sino que integran dicha información con coordenadas geográficas precisas, generando mapas de rendimiento que constituyen la base empírica para la toma de decisiones agronómicas estratégicas. A partir de estos mapas es posible identificar zonas de alta y baja productividad, evaluar la respuesta de los cultivos a diferentes prácticas de manejo y diseñar estrategias de intervención diferenciadas que optimicen el uso de insumos y maximicen la rentabilidad del sistema productivo.

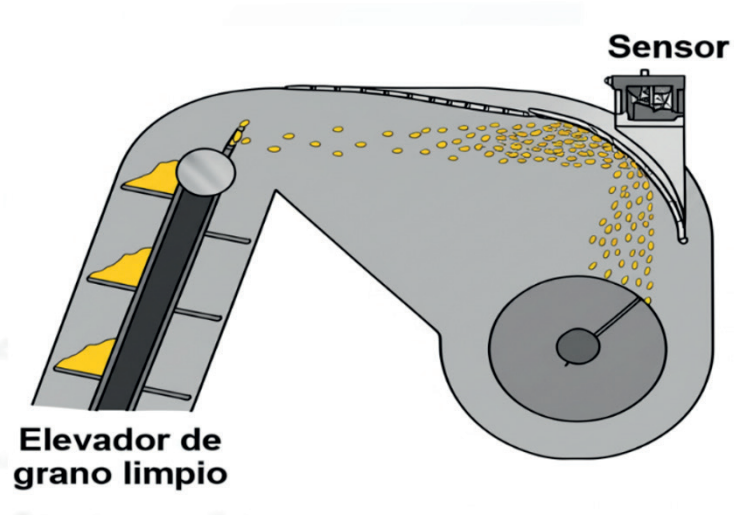
1.1.1 Componentes clave y funcionamiento

Un monitor de rendimiento típico integrado en una cosechadora es un sistema tecnológico complejo que opera mediante la interacción coordinada de varios componentes, diseñados para la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos productivos. Entre estos componentes, el sensor de flujo de grano desempeña un papel central, al ser el encargado de cuantificar la cantidad de material cosechado que circula a través de la máquina durante la operación.

- El sensor de flujo de grano puede basarse en diferentes principios de medición, siendo el sistema de placa de impacto el más común y ampliamente utilizado debido a su robustez y confiabilidad bajo diversas condiciones de cosecha. En este mecanismo, el grano limpio, una vez transportado por el elevador de la cosechadora, impacta contra una placa sensora. La fuerza generada por dicho impacto es directamente proporcional a la masa o volumen del grano en movimiento (Ver figura 1). Esta fuerza es detectada por sensores de presión o celdas de carga, generalmente de tipo piezoeléctrico o extensométrico, que convierten la señal mecánica en una señal eléctrica cuantificable. Posteriormente, esta señal

es procesada por el sistema para estimar el flujo instantáneo de grano, permitiendo así una medición continua y en tiempo real del rendimiento a medida que la cosechadora avanza por el campo (Grisso et al., 2014; Zhang et al., 2012).

Figura 1. *Sensor de Flujo de Grano*



Fuente: Esta investigación

- Sensores Ópticos o Ultrasónicos: Además de la tecnología basada en placas de impacto, existen sensores ópticos y ultrasónicos que, aunque menos difundidos en las cosechadoras comerciales, constituyen una alternativa válida para la cuantificación del flujo de material cosechado. Su principio de funcionamiento se fundamenta en la estimación del volumen de grano que circula a través de un conducto específico o en la medición de la velocidad del flujo. En el caso de los sensores ópticos, la detección se realiza mediante la interrupción de haces de luz, lo que permite identificar y contabilizar las partículas que atraviesan el sistema. Por su parte, los sensores ultrasónicos emplean ondas sonoras

para estimar la densidad y la velocidad del flujo de grano. La información capturada por estos dispositivos es posteriormente procesada y correlacionada con el rendimiento volumétrico del cultivo. No obstante, en comparación con los sistemas de placa de impacto, estos sensores suelen presentar una mayor sensibilidad a variaciones en el tipo de grano, el tamaño de las partículas y las condiciones operativas, lo que implica requerimientos de calibración más estrictos y una mayor complejidad en su ajuste y validación (Ver figura 2).

Figura 2. *Sensores de ultrasonido*

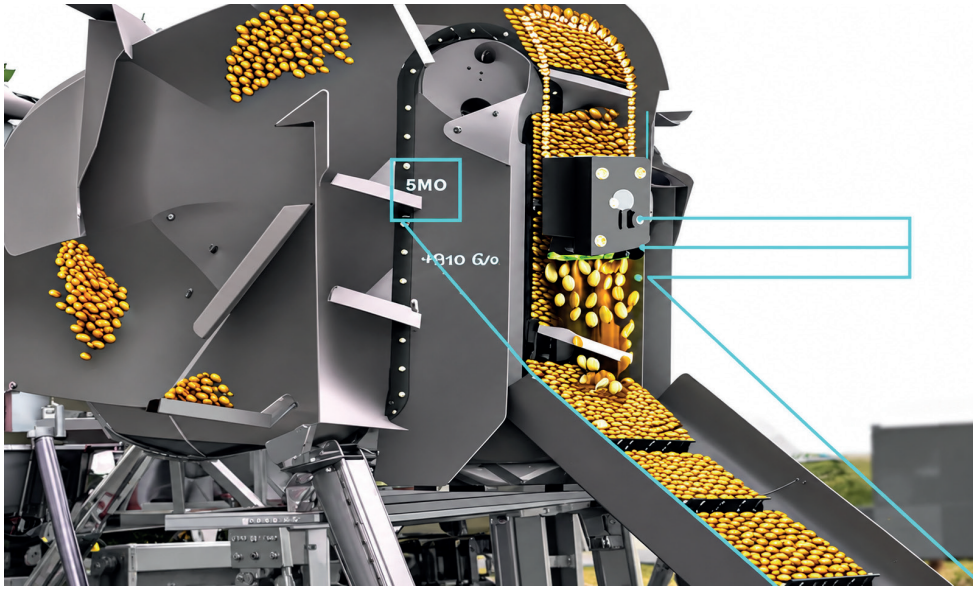


Fuente: Esta investigación

- Sensores de Elevador: Algunos sistemas de monitoreo de rendimiento, en lugar de cuantificar directamente el impacto del grano, se basan en la medición de la carga o del par mecánico que experimenta el elevador de grano limpio de la cosechadora durante la operación. En este enfoque, el esfuerzo generado por el material en ascenso ejerce una resistencia sobre el sistema de elevación, la cual se correlaciona de manera directa con el flujo de grano que está siendo transportado. Esta variación en la carga o en el par es detectada mediante sensores específicos, cuya señal analógica es posteriormente convertida a formato digital y procesada por la

unidad de control del monitor de rendimiento para estimar la masa de grano cosechada en tiempo real. Una de las principales ventajas de este método es que puede presentar una menor sensibilidad a las irregularidades en la uniformidad del flujo de material, en comparación con los sistemas basados en placas de impacto. No obstante, su precisión depende en gran medida de una calibración cuidadosa y del adecuado mantenimiento mecánico del elevador, factores críticos para garantizar la confiabilidad de las mediciones obtenidas (Ver figura 3).

Figura 3. *Sensores de elevador de granos*



Fuente: Esta investigación

a. Sensor de humedad del grano: El sensor de humedad del grano es un componente indispensable dentro del sistema de monitoreo de rendimiento, ya que permite medir en tiempo real el porcentaje de humedad del grano a medida que este atraviesa la cosechadora. La determinación precisa de este parámetro resulta crítica, dado que

el rendimiento agrícola debe expresarse siempre sobre una base de humedad estándar, por ejemplo, 14 % para maíz o 13 % para trigo con el fin de garantizar comparaciones válidas y consistentes entre distintas zonas dentro de un mismo lote, entre parcelas diferentes o entre campañas agrícolas sucesivas. La mayoría de estos sensores operan mediante la medición de las propiedades eléctricas del grano, utilizando principios de capacitancia o conductividad eléctrica - CE, las cuales varían en función del contenido de agua presente en el material cosechado. Una calibración adecuada de este sensor es esencial para evitar errores sistemáticos que puedan distorsionar la estimación final del rendimiento (Grisso et al., 2014).

b. Receptor GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite): El receptor GNSS, comúnmente denominado GPS, es el componente encargado de proporcionar la ubicación geográfica precisa (latitud y longitud) asociada a cada medición de flujo y humedad del grano. En los sistemas modernos, estos receptores suelen integrar múltiples constelaciones satelitales, como GLONASS, Galileo o BeiDou, lo que mejora la disponibilidad y estabilidad de la señal. La capacidad de georreferenciar cada dato de rendimiento es lo que permite la generación de mapas productivos espacialmente explícitos y de alta resolución. Dado que la calidad del mapa depende directamente de la exactitud posicional, muchos sistemas incorporan correcciones diferenciales (DGPS) o tecnologías de posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK), que reducen significativamente los errores inherentes a la señal GNSS bruta y permiten alcanzar precisiones del orden de centímetros (Searcy et al., 2017).

c. Consola de visualización y registro de datos: La consola de visualización y registro constituye la interfaz principal entre el operador y el sistema de monitoreo de rendimiento. Ubicada en la cabina de la cosechadora, esta pantalla permite al operador visualizar en tiempo real variables clave como el rendimiento instantáneo

por unidad de área, el rendimiento promedio acumulado del lote, el contenido de humedad del grano, la velocidad de avance de la máquina y el área cosechada. De forma simultánea y automatizada, la consola registra todos estos datos junto con la información de posicionamiento GNSS en dispositivos de almacenamiento extraíbles, como memorias USB o tarjetas SD. Posteriormente, estos datos son transferidos a software especializado de agricultura de precisión, donde se procesan, depuran y analizan para la generación de mapas temáticos y el apoyo a la toma de decisiones agronómicas (Mulla, 2013).

d. Sensor de velocidad de avance: El sensor de velocidad de avance mide con precisión la velocidad a la que la cosechadora se desplaza a través del campo, un dato esencial para el cálculo correcto del rendimiento expresado en unidades de masa por unidad de superficie. La velocidad puede determinarse mediante sensores de radar independientes, que miden el desplazamiento respecto al suelo, o derivarse directamente de las lecturas temporales del receptor GNSS, especialmente cuando se emplean sistemas de alta precisión. Una medición confiable de la velocidad es fundamental para evitar errores en la estimación del rendimiento, particularmente en condiciones de variaciones frecuentes en la velocidad de operación (Searcy et al., 2017).

e. Sensor de ancho de plataforma: Aunque no siempre considerado un sensor activo en el sentido estricto de una medición dinámica, la correcta configuración del ancho de la plataforma de corte es un parámetro crítico dentro del sistema de monitoreo de rendimiento. El ancho ingresado en la consola debe corresponder al ancho real de corte efectivo de la cosechadora, ya que cualquier discrepancia se traduce directamente en errores en el cálculo del rendimiento por unidad de área. Algunos sistemas más avanzados incorporan sensores específicos o algoritmos basados en procesamiento de datos que permiten detectar

automáticamente el ancho activo de la plataforma, reduciendo así la dependencia de la configuración manual y minimizando posibles errores humanos (Grisso et al., 2014).

1.1.2 Consideraciones críticas y calibración

La fiabilidad y precisión de los datos generados por los monitores de rendimiento dependen de manera crítica de una calibración adecuada y periódica del sistema (Grisso et al., 2014). Una calibración deficiente o incompleta puede derivar en la generación de mapas de rendimiento erróneos, lo que a su vez conduce a interpretaciones equivocadas de la variabilidad espacial del cultivo y, en consecuencia, a decisiones agronómicas incorrectas que comprometen la eficiencia técnica y económica del sistema productivo. En este sentido, la inversión en un monitor de rendimiento solo alcanza su máximo valor cuando se acompaña de una operación cuidadosa, una calibración rigurosa y un mantenimiento constante a lo largo del tiempo. Los principales procedimientos de calibración que deben considerarse incluyen los siguientes ítems dados en la Tabla 1:

Tabla 1. *Consideraciones críticas y procedimientos de calibración del monitor de rendimiento*

Componente de calibración	Objetivo técnico	Procedimiento	Frecuencia recomendada	Riesgo si no se calibra correctamente	Impacto agronómico
Calibración del flujo de grano	Ajustar la estimación del rendimiento real	1. Cosechar área conocida. 2. Pesar grano manualmente con balanza confiable. 3. Comparar peso real vs. lectura del monitor. 4. Repetir en zonas de bajo, medio y alto rendimiento. 5. Construir curva de calibración.	• Al inicio de cada campaña. • Para cada cultivo. • Cuando cambian condiciones operativas.	• Mapas de rendimiento erróneos. • Sobreestimación o subestimación productiva. • Prescripciones incorrectas.	Afecta decisiones de fertilización variable y análisis de rentabilidad.

Componente de calibración	Objetivo técnico	Procedimiento	Frecuencia recomendada	Riesgo si no se calibra correctamente	Impacto agronómico
Calibración del sensor de humedad	Asegurar precisión en corrección de rendimiento a base estándar	1. Comparar lectura del monitor. 2. Medir humedad con equipo patrón calibrado en laboratorio. 3. Ajustar sensor si existen diferencias.	• Inicio de campaña. • Cambio de lote. • Cambio de condiciones climáticas.	• Error en rendimiento corregido. • Distorsión en comparaciones interanuales.	Influye en análisis de calidad y comercialización del grano.
Verificación del ancho de plataforma	Garantizar cálculo correcto de rendimiento por superficie	1. Medir ancho real de corte. 2. Configurar exactamente el mismo valor en el software del monitor.	• Antes de iniciar cosecha. • Cambio de plataforma.	• Error sistemático en rendimiento por hectárea. • Mapas con sesgo constante.	Distorsiona análisis espacial y zonificación productiva.
Verificación del retardo de cosechadora	Sincronizar medición de flujo con posición GNSS	1. Determinar tiempo entre corte y llegada del grano al sensor. 2. Ajustar retardo en sistema. 3. Verificar coherencia espacial en mapa.	• Inicio de campaña. • Ajustes mecánicos en cosechadora.	• Desfase espacial en mapas. • Desplazamiento incorrecto de zonas productivas.	Dificulta interpretación de variabilidad y correlación con suelos.

Fuente: Modificado de Jones (2004)

1.2.2 Plataformas y tipos de sensores

Los sensores remotos son desplegados en diversas plataformas, cada una con sus propias ventajas operacionales y limitaciones técnicas.

A. Satélites: Ofrecen una cobertura geográfica global y proporcionan acceso a extensas series de datos históricos que abarcan décadas. Proyectos emblemáticos como Landsat (desarrollado por la NASA y el USGS), Sentinel-2 (de la Agencia Espacial Europea) y la constelación de satélites de Planet Labs, suministran imágenes con resoluciones espaciales que pueden variar desde los 3 hasta los 30 metros. Su resolución temporal (frecuencia de revisita) oscila entre días y semanas, lo que los hace ideales para el monitoreo a gran escala de grandes extensiones agrícolas y para la detección de tendencias a largo plazo en el desarrollo de los cultivos y la gestión del paisaje agrícola (Zhang et al., 2012).

- Ventajas: Cobertura geoespacial extremadamente amplia, disponibilidad de datos históricos de largo plazo, y bajo costo de acceso para muchos datos que son de dominio público o con licencia abierta.

- Limitaciones: La resolución espacial y temporal de algunas misiones satelitales puede no ser suficiente para una gestión detallada a nivel de lote en todos los escenarios agrícolas. Además, la presencia de nubosidad persistente puede impedir la toma de imágenes claras y limitar la disponibilidad de datos.

B. Aeronaves Tripuladas (Aviones): Permiten la captura de imágenes con una resolución espacial extremadamente alta (que puede variar desde centímetros hasta decímetros), lo que posibilita un nivel de detalle inigualable. Además, ofrecen la flexibilidad de programar vuelos en momentos específicos del ciclo del cultivo o en respuesta a eventos agronómicos particulares. Suelen transportar sensores más avanzados, incluyendo los sensores hiperespectrales, que capturan información en cientos de bandas

espectrales estrechas, proporcionando una caracterización espectral mucho más rica de la vegetación y el suelo (Mulla, 2013).

- Ventajas: Ultra-alta resolución espacial, excepcional flexibilidad de programación para vuelos en momentos críticos, y capacidad para albergar sensores de mayor peso y complejidad.

- Limitaciones: Los costos operativos asociados a las aeronaves tripuladas son significativamente altos, lo que los hace menos accesibles para la agricultura a pequeña y mediana escala. Su cobertura por vuelo es menor en comparación con los satélites.

C. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs o Drones): Han emergido como una herramienta revolucionaria para el monitoreo de cultivos, destacando por su flexibilidad operativa, su costo relativo más bajo en comparación con las aeronaves tripuladas y, crucialmente, su capacidad para obtener imágenes de ultra-alta resolución (desde milímetros hasta pocos centímetros). Los drones pueden equiparse con una variedad de cargas útiles, incluyendo cámaras RGB (fotografía convencional), cámaras multiespectrales (que capturan bandas específicas del espectro) o cámaras térmicas, adaptándose a diversas necesidades de monitoreo y diagnóstico (Hunt et al., 2013).

- Ventajas: Resolución espacial y temporal excepcionales, despliegue rápido y bajo demanda, capacidad de volar por debajo de la capa de nubes (lo que reduce las limitaciones por nubosidad), y versatilidad en la elección de sensores.

- Limitaciones: La cobertura por vuelo es intrínsecamente limitada, lo que los hace más adecuados para el monitoreo de lotes pequeños a medianos. También están sujetos a regulaciones de vuelo específicas y a la duración limitada de la batería de sus sistemas de propulsión.

1.2.3 Índices de vegetación: El lenguaje de la salud vegetal

Como se ha señalado en capítulos anteriores, la información de reflectancia capturada por los sensores remotos es procesada mediante algoritmos matemáticos para generar los denominados índices de vegetación. Estos índices corresponden a combinaciones numéricas de la reflectancia registrada en diferentes bandas espectrales del espectro electromagnético y han sido diseñados para maximizar la sensibilidad a la presencia, cantidad y estado fisiológico de la vegetación. Al mismo tiempo, buscan reducir la influencia de factores externos como el fondo de suelo desnudo, las variaciones en la iluminación o las perturbaciones atmosféricas, permitiendo así una interpretación más robusta del comportamiento del cultivo a escala espacial.

Entre los índices de vegetación más ampliamente utilizados en agricultura de precisión se destaca el NDVI, el cual es, con diferencia, el más estudiado y aplicado en contextos agrícolas. El NDVI se calcula mediante la siguiente expresión: NDVI = (NIR − Rojo) / (NIR + Rojo), donde la banda del infrarrojo cercano (NIR) corresponde a la región del espectro en la que la vegetación sana presenta una elevada reflectancia, asociada a una estructura celular foliar intacta y a un alto contenido de agua, mientras que la banda roja representa la región en la que la clorofila absorbe fuertemente la radiación para el proceso fotosintético. Los valores del NDVI oscilan entre −1 y +1; valores cercanos a +1 son indicativos de vegetación densa y fisiológicamente activa, mientras que valores próximos a cero o negativos suelen asociarse con suelo desnudo, cuerpos de agua o superficies no vegetadas.

No obstante, si bien el NDVI es altamente útil, presenta ciertas limitaciones, particularmente en condiciones de alta biomasa, donde puede saturarse y perder sensibilidad. Por esta razón, se han desarrollado otros índices de vegetación que permiten abordar situaciones específicas o mejorar la interpretación bajo determinadas condiciones agronómicas. Entre ellos se encuentra el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), el cual fue diseñado

para reducir la saturación en áreas con alta densidad vegetal y para ser más robusto frente a los efectos atmosféricos y del fondo del suelo, resultando especialmente útil en regiones con vegetación densa y heterogénea.

Otro índice ampliamente empleado es el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), que incorpora un factor de corrección del suelo en su formulación con el objetivo de minimizar la influencia de la reflectancia del suelo subyacente. Este índice es particularmente adecuado durante las etapas iniciales del desarrollo del cultivo, cuando la cobertura vegetal es aún reducida, o en sistemas productivos con baja densidad foliar. Asimismo, el Índice de Diferencia Normalizada del Borde Rojo (NDRE) utiliza la banda espectral conocida como red edge, altamente sensible a variaciones en el contenido de clorofila y nitrógeno. Este índice resulta especialmente valioso en etapas avanzadas del ciclo del cultivo o en condiciones de alto vigor vegetativo, donde el NDVI puede perder capacidad discriminatoria.

A pesar del enorme potencial de la teledetección y de los índices de vegetación para el monitoreo agrícola, su aplicación presenta una serie de desafíos y consideraciones que deben ser cuidadosamente abordados. En primer lugar, las imágenes adquiridas por satélites o drones requieren un procesamiento riguroso que incluya correcciones radiométricas y atmosféricas, ajustes por variaciones en la iluminación y una georreferenciación espacial precisa. Errores en estas etapas pueden generar interpretaciones erróneas de la información espectral. En segundo lugar, la interpretación de los índices de vegetación debe realizarse con cautela, ya que un valor elevado de un índice no siempre se traduce directamente en un mayor rendimiento final. Por ejemplo, un exceso de nitrógeno puede inducir un crecimiento vegetativo exuberante, reflejado en altos valores de NDVI, sin que ello implique necesariamente un incremento en la producción de grano o frutos.

Adicionalmente, factores ambientales como la nubosidad, la época del año y el ángulo solar al momento de la adquisición de las imágenes pueden afectar significativamente la calidad y comparabilidad de los datos

espectrales. A esto se suma el aspecto económico, ya que, aunque muchos productos satelitales están disponibles de forma gratuita o a bajo costo, el acceso a imágenes de ultra-alta resolución obtenidas mediante drones o a servicios especializados de análisis puede representar una inversión considerable para el productor.

En conjunto, la teledetección y los sensores remotos constituyen herramientas de diagnóstico y monitoreo excepcionalmente potentes y complementarias dentro del enfoque de la agricultura de precisión. Al proporcionar una visión sinótica y detallada del campo y al revelar patrones de vigor y salud del cultivo incluso antes de que sean evidentes a nivel del suelo, estas tecnologías permiten una gestión agrícola proactiva y una evaluación continua del estado productivo. Su integración con observaciones de campo y con los mapas de rendimiento generados por las cosechadoras fortalece significativamente la toma de decisiones agronómicas y contribuye a la optimización sostenible de los sistemas productivos (Mulla, 2013; Sishodia et al., 2020).

1.3 Sensores de suelo

Mientras que los monitores de rendimiento permiten conocer con precisión qué cantidad de producto se cosechó en cada punto del campo, y la teledetección ofrece información sobre cómo se desarrolló el cultivo a lo largo de su ciclo mediante indicadores de vigor y estado fisiológico, los sensores de suelo desempeñan un papel fundamental al ayudarnos a comprender por qué se presenta la variabilidad observada en el rendimiento. Este entendimiento se logra a partir de la caracterización de las propiedades intrínsecas y dinámicas del medio de crecimiento, es decir, el suelo. El suelo constituye el soporte básico de la producción agrícola, y sus propiedades físicas, químicas y biológicas influyen de manera directa en la disponibilidad de agua y nutrientes, en la aireación radicular y, en última instancia, en el potencial productivo final de los cultivos. En este contexto, la aplicación estratégica de sensores de suelo dentro del enfoque de la agricultura de precisión permite una caracterización detallada de la

variabilidad subsuperficial, lo cual resulta esencial para la implementación de estrategias de manejo diferenciado y la optimización de los sistemas productivos (Gebbers & Adamchuk, 2010).

1.3.1 Tipos principales de sensores de suelo en agricultura de precisión

Los sensores de suelo utilizados en agricultura de precisión pueden clasificarse de acuerdo con la propiedad edáfica que miden y según su método de operación, es decir, si requieren contacto directo con el suelo o si operan de manera remota. A continuación, se describen los principales tipos de sensores empleados en este contexto.

a. Sensores de conductividad eléctrica aparente (CEa): La CEa es una medida de la facilidad con la que una corriente eléctrica o un campo electromagnético atraviesa el suelo. Este parámetro edáfico está influenciado por múltiples factores, entre ellos la textura del suelo especialmente el contenido de arcilla y limo, el contenido de humedad volumétrica, la salinidad, la materia orgánica, la temperatura y la densidad aparente. En términos generales, los suelos con mayor contenido de arcilla y humedad presentan valores más elevados de CEa, mientras que los suelos arenosos o secos exhiben valores más bajos (Adamchuk et al., 2004).

. Desde el punto de vista tecnológico, existen dos enfoques principales para la medición de la CEa. Los sensores galvánicos o de contacto utilizan electrodos metálicos que penetran el suelo y miden la resistencia al paso de una corriente eléctrica inyectada directamente en el perfil edáfico. En contraste, los sensores de inducción electromagnética no requieren contacto directo con el suelo; estos dispositivos generan un campo electromagnético primario que induce un campo secundario en el suelo, cuya intensidad es proporcional a la CEa. Este segundo enfoque permite una adquisición de datos más rápida y menos invasiva, siendo

especialmente adecuado para mapeos continuos a gran escala. Los mapas de CEa obtenidos constituyen una herramienta clave para la identificación de la variabilidad espacial en la textura del suelo y en la capacidad de retención de agua y nutrientes, características relativamente estables en el tiempo y fundamentales para la zonificación de manejo.

b. Sensores de humedad del suelo: Los sensores de humedad del suelo miden el contenido volumétrico de agua presente en el perfil edáfico, una variable crítica para el manejo eficiente del riego y la evaluación del estado hídrico del cultivo. Existen diversas tecnologías para este propósito. Las sondas TDR (Time Domain Reflectometry) determinan el contenido de agua midiendo el tiempo que tarda un pulso electromagnético en recorrer varillas insertadas en el suelo, siendo altamente precisas y ampliamente utilizadas tanto en investigación como en aplicaciones comerciales (Robinson et al., 2008). Los sensores capacitivos, por su parte, estiman la humedad a partir de cambios en la constante dieléctrica del suelo, y son comunes en sistemas de riego automatizado. También se emplean sensores de neutrones, que ofrecen mediciones muy precisas mediante la interacción de neutrones con los átomos de hidrógeno del agua del suelo, aunque su uso está restringido por normativas de seguridad radiológica (Evett et al., 2012). Finalmente, los tensiómetros miden el potencial mátrico del suelo, proporcionando una estimación directa de la disponibilidad de agua para las plantas, especialmente en rangos de humedad elevados (Wolfert et al., 2017). En conjunto, estos sensores permiten un monitoreo continuo de la dinámica hídrica del suelo, facilitando la optimización de la programación del riego y la detección de problemas de drenaje o infiltración.

c. Sensores de nutrientes (N, P, K, pH): Los sensores de nutrientes tienen como objetivo estimar la concentración de iones específicos, como nitratos, fosfatos o potasio, así como medir el pH del suelo,

un parámetro determinante para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes. Entre las tecnologías más estudiadas se encuentran los sensores de ión específico (ISE), que miden la actividad iónica en la solución del suelo, y los sensores ópticos, que aprovechan propiedades espectrales del suelo para inferir concentraciones de determinados nutrientes. Asimismo, los sensores de pH, tanto de laboratorio como de campo, permiten evaluar la acidez o alcalinidad del suelo de manera más dinámica. Aunque estas tecnologías presentan un alto potencial para la fertilización de tasa variable y el ajuste preciso de prácticas de encalado, su aplicación generalizada en condiciones de campo aún enfrenta desafíos relacionados con la calibración, la durabilidad y la estabilidad de las mediciones.

d. Sensores de materia orgánica (MO): La materia orgánica del suelo es un componente clave de la fertilidad edáfica, ya que influye en la estructura del suelo, la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica. Los sensores de materia orgánica suelen basarse en técnicas ópticas o espectroscópicas, aprovechando la capacidad de este componente para absorber y reflejar la radiación en el espectro visible e infrarrojo cercano. Algunos equipos agrícolas pueden incorporar sensores ópticos en línea que permiten mapear el contenido de materia orgánica durante las labores de labranza, generando información espacialmente explícita. Estos mapas son fundamentales para una gestión precisa del suelo, dado que la materia orgánica está estrechamente relacionada con la CEa, la capacidad de almacenamiento de agua y el potencial productivo del sistema agrícola.

2. Medición manual y parcelas de calibración

La medición manual hace referencia a la recolección directa de datos agronómicos en el campo por parte de agricultores, técnicos especializados o personal de investigación. A pesar del acelerado avance de las tecnologías

digitales y de la creciente automatización de los sistemas de monitoreo, esta práctica continúa siendo un componente indispensable dentro de la agricultura de precisión. Su relevancia radica en que permite validar, complementar y contextualizar la información generada por sensores, plataformas de teledetección y sistemas de adquisición automática de datos, garantizando así la confiabilidad y la correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Uno de los principales aportes de la medición manual es la validación de los datos obtenidos por sensores y plataformas remotas. Los mapas de rendimiento generados por cosechadoras, las imágenes satelitales o de drones procesadas mediante índices de vegetación como el NDVI y los datos provenientes de sensores de suelo ofrecen estimaciones indirectas del estado del cultivo y del medio edáfico. La medición directa en puntos estratégicamente seleccionados del campo, incluyendo variables como la altura de las plantas, el número de macollos, la densidad de plantas, el peso de la biomasa aérea o radicular y el contenido de humedad gravimétrica del grano, permite contrastar estas estimaciones con valores reales. Cuando se identifican discrepancias significativas, estas mediciones sirven como base para realizar ajustes y recalibraciones, asegurando la exactitud de los datos georreferenciados (Pierce & Nowak, 1999; Mulla, 2013).

Asimismo, la identificación temprana de problemas localizados constituye otra fortaleza fundamental de la medición manual. La observación directa del cultivo en el campo posibilita detectar de manera precoz focos incipientes de plagas y enfermedades, síntomas específicos de deficiencias nutricionales, condiciones de estrés hídrico localizado o daños mecánicos, que pueden no ser claramente evidentes en los datos remotos o que requieren una confirmación visual in situ. Esta capacidad de inspección detallada a nivel de planta sigue siendo un complemento insustituible de la teledetección y del monitoreo automatizado (Zhang et al., 2012).

La medición manual también cumple un papel esencial en la contextualización de los patrones espaciales de rendimiento. La interpretación de

mapas de rendimiento o de vigor vegetativo se enriquece significativamente cuando se combina con observaciones de campo que permiten explicar las causas subyacentes de la variabilidad. Por ejemplo, zonas recurrentemente identificadas con bajo rendimiento pueden asociarse a problemas de anegamiento, compactación del suelo, limitaciones físicas del perfil edáfico o ataques fitosanitarios específicos, aspectos que solo pueden confirmarse mediante una evaluación directa en el sitio. Esta contextualización permite avanzar desde la simple descripción de patrones hacia un diagnóstico agronómico sólido.

Desde una perspectiva operativa, la medición manual ofrece una elevada flexibilidad y adaptabilidad, especialmente en contextos donde el acceso a tecnologías avanzadas es limitado por razones económicas, logísticas o de infraestructura. En estos escenarios, la recolección manual de datos sigue siendo el método principal, y en muchos casos el único, para obtener información agronómica relevante. Además, resulta particularmente útil en ensayos experimentales, evaluaciones de nuevas prácticas culturales, introducción de nuevas variedades o validación de dosis de insumos a pequeña escala, antes de su implementación generalizada en la explotación agrícola.

Finalmente, la medición manual es fundamental para la recopilación de datos destinados al desarrollo y validación de modelos predictivos. Muchos modelos de crecimiento y desarrollo de cultivos, así como modelos agronométricos de predicción de rendimiento, requieren datos de campo específicos y de alta calidad para su calibración inicial, entrenamiento y validación. Variables como la acumulación de biomasa en diferentes etapas fenológicas, el contenido de nutrientes foliares o las tasas de crecimiento son obtenidas principalmente mediante mediciones directas. La recolección sistemática y rigurosa de estos datos constituye, por tanto, un pilar esencial para mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos utilizados en la agricultura de precisión (Jones et al., 2004).

2.1 Parcelas de calibración

Las parcelas de calibración, también denominadas parcelas de prueba o de validación, son áreas geográficamente delimitadas y representativas dentro de un campo agrícola donde se aplican tratamientos específicos o se monitorean condiciones de cultivo de forma intensiva y controlada. Su objetivo es múltiple y resulta esencial para la correcta validación, ajuste y optimización de las tecnologías utilizadas en la agricultura de precisión.

- Calibrar equipos y sensores: Este es uno de los usos más directos y fundamentales de las parcelas de calibración. Por ejemplo, un monitor de rendimiento instalado en una cosechadora puede calibrarse con mayor precisión al cosechar una parcela de calibración, pesar manualmente el grano recolectado mediante una balanza de alta exactitud y ajustar posteriormente las lecturas del monitor para que coincidan con el peso real verificado. Este procedimiento es crítico para garantizar que los mapas de rendimiento reflejen fielmente la realidad productiva del campo (Doerge, 2002; Grisso et al., 2014). De manera similar, sensores de CEa, sensores ópticos de biomasa aérea o sensores de humedad del suelo pueden calibrarse y validarse comparando sus lecturas con mediciones directas realizadas en estas parcelas de referencia.

- Evaluar la eficacia de nuevas tecnologías o prácticas agronómicas: Las parcelas de calibración permiten el establecimiento de experimentos controlados en condiciones reales de producción, lo que facilita la comparación rigurosa del desempeño de nuevas variedades de cultivo, la respuesta a dosis variables de fertilizantes, el efecto de productos fitosanitarios innovadores o la eficiencia de sistemas de riego de precisión. Al mantener un control experimental adecuado, se incrementa la certeza de que las diferencias observadas en el rendimiento o en el desarrollo del cultivo están asociadas directamente a la práctica o tecnología evaluada.

- Generar datos para la toma de decisiones localizada: La información obtenida en las parcelas de calibración proporciona una base empírica sólida para la toma de decisiones agronómicas ajustadas a las condiciones específicas de cada zona del campo. Por ejemplo, si una parcela sometida a una dosis reducida de fertilizante nitrogenado alcanza un rendimiento estadísticamente similar al de una parcela manejada con dosis estándar, esto puede indicar una oportunidad concreta para optimizar el uso de insumos, reducir costos de producción y minimizar impactos ambientales sin comprometer la productividad (Basso et al., 2013).

- Desarrollo y refinamiento de zonas de manejo: Cuando las parcelas de calibración se establecen estratégicamente dentro de diferentes zonas de manejo definidas previamente a partir de información edáfica, topográfica o productiva, permiten validar de forma empírica si la respuesta del cultivo a los insumos o prácticas aplicadas varía significativamente entre dichas zonas. Este enfoque contribuye al refinamiento de las estrategias de manejo sitio-específico, fortaleciendo la lógica de la gestión diferenciada y aumentando la eficiencia técnica del sistema productivo.

- Cuantificación del impacto económico y ambiental: Las parcelas de calibración permiten medir con precisión tanto el rendimiento productivo como el uso de insumos clave, como agua, fertilizantes y energía, bajo diferentes esquemas de manejo. Esta información posibilita la realización de análisis de costo-beneficio y la evaluación de indicadores ambientales, como la eficiencia en el uso de recursos y la reducción de la huella ambiental o de carbono. De este modo, se genera una base objetiva para evaluar la sostenibilidad económica y ambiental de las estrategias implementadas en la agricultura de precisión.

2.2 Importancia del monitoreo del rendimiento y evaluación de resultados

La integración sinérgica de la medición manual y el establecimiento de parcelas de calibración constituye un componente absolutamente esencial para lograr un monitoreo robusto del rendimiento y una evaluación precisa y confiable de los resultados en el contexto de la agricultura de precisión. Esta combinación permite articular la información generada por tecnologías avanzadas con la realidad observada directamente en el campo, fortaleciendo la calidad de los análisis y la toma de decisiones agronómicas (ver tabla 2).

Tabla 2. *Función estratégica de las parcelas de calibración en Agricultura de precisión*

Dimensión estratégica	Descripción técnica sintetizada	Beneficio agronómico y técnico	Impacto económico	Riesgo si no se implementa
Mejora de la precisión de mapas de rendimiento	Calibración rigurosa mediante pesaje manual del grano en parcelas de prueba para ajustar el monitor de rendimiento.	Representación fiel de la variabilidad espacial y correcta zonificación productiva.	Evita decisiones erróneas que afectan la eficiencia del sistema.	Mapas distorsionados y prescripciones incorrectas.
Validación de modelos predictivos	Uso de datos de rendimiento, biomasa, nutrientes y variables edáficas para ajustar modelos de crecimiento y predicción.	Mayor robustez en sistemas de apoyo a la decisión y en prescripciones variables.	Reduce riesgo de inversión basada en modelos imprecisos.	Modelos débiles y recomendaciones poco confiables.
Toma de decisiones basada en evidencia	Integración de datos masivos de sensores con mediciones manuales y observación directa del cultivo y suelo.	Comprensión no solo del "dónde", sino del "por qué" de la variabilidad productiva.	Mejora asignación de recursos y priorización de intervenciones.	Diagnósticos superficiales basados únicamente en mapas digitales.

Dimensión estratégica	Descripción técnica sintetizada	Beneficio agronómico y técnico	Impacto económico	Riesgo si no se implementa
Optimización del uso de insumos	Ajuste de dosis de fertilizantes, agua y agroquímicos según respuesta real del cultivo en zonas homogéneas.	Mayor eficiencia técnica y reducción del impacto ambiental.	Disminución de costos operativos y mejora de márgenes netos.	Sobre aplicación o sub aplicación de insumos.
Mejora continua del sistema productivo	Retroalimentación iterativa entre sensores, mediciones manuales y resultados productivos en cada campaña.	Refinamiento progresivo de estrategias de manejo.	Incremento sostenido de productividad y sostenibilidad.	Estancamiento tecnológico y repetición de errores interanuales.
Evaluación del retorno de la inversión (ROI)	Cuantificación precisa de respuesta productiva frente a distintos regímenes de manejo y comparación directa costos–ingresos.	Demostración objetiva del beneficio económico de la AP.	Justificación financiera de adopción tecnológica.	Dificultad para demostrar rentabilidad real de la tecnología.

Fuente: Modificado de (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, (2004); Gebbers & Adamchuk, (2010); Basso et al., 2013) & Grisso et al., (2014).

En síntesis, la medición manual y el uso de parcelas de calibración no deben considerarse como prácticas obsoletas frente al avance tecnológico, sino como componentes esenciales que garantizan la confiabilidad de los datos recolectados, la precisión de las decisiones agronómicas y la validación empírica de los resultados obtenidos. Estas herramientas actúan como un verdadero "ancla de la realidad", conectando la sofisticación tecnológica de la agricultura de precisión con las condiciones edáficas, climáticas y biológicas reales del campo, y permitiendo a los agricultores maximizar la eficiencia productiva y la rentabilidad de sus sistemas de manera informada y sostenible.

2.3. Generación de mapas de rendimiento.

En esencia, un mapa de rendimiento es una representación geoespacial bidimensional que describe la variabilidad espacial del rendimiento de un cultivo dentro de una parcela agrícola. Este tipo de mapa emplea escalas cromáticas graduales para expresar visualmente las diferencias productivas, donde las zonas de alto rendimiento suelen representarse mediante tonalidades cálidas como verdes o amarillos que indican una mayor productividad, mientras que las zonas de bajo rendimiento se asocian comúnmente con colores fríos como azules o rojos que reflejan menores niveles de producción. Esta codificación visual facilita una interpretación rápida e intuitiva de la heterogeneidad productiva del lote, permitiendo identificar patrones espaciales relevantes sin necesidad de un análisis numérico inmediato.

Los mapas de rendimiento se generan a partir de datos georreferenciados recolectados en tiempo real durante la operación de cosecha, mediante monitores de rendimiento integrados en las cosechadoras. Estos datos combinan información sobre la cantidad de producto cosechado, la humedad del grano y la posición geográfica precisa de cada medición, constituyéndose en una de las herramientas fundamentales de la agricultura de precisión para el análisis, la evaluación y la toma de decisiones agronómicas sitio-específicas.

2.3.1 Componentes clave para la generación de un mapa de rendimiento

La generación de un mapa de rendimiento preciso, confiable y agronómicamente significativo requiere la integración coordinada de diversos sistemas y tecnologías que operan de manera conjunta para capturar, procesar y representar espacialmente la información productiva del cultivo.

a. Monitor de rendimiento (Yield Monitor): El monitor de rendimiento constituye el núcleo operativo del sistema de mapeo de rendimiento. Instalado directamente en la cosechadora, este dispositivo mide de forma continua el flujo de grano que ingresa al elevador o al tanque de la máquina durante la operación de cosecha. Los monitores de rendimiento modernos emplean sensores especializados como sensores de impacto o de flujo másico que permiten cuantificar con alta precisión el volumen o el peso del grano cosechado por unidad de tiempo. Para que esta medición sea agronómicamente válida, el sistema integra varios sensores clave: el sensor de flujo de grano, responsable de la cuantificación directa del rendimiento; el sensor de humedad del grano, indispensable para ajustar los valores a una base de humedad estándar; y el sensor de velocidad de avance de la cosechadora, necesario para calcular el rendimiento expresado por unidad de área. La correcta calibración y sincronización de estos sensores es fundamental para garantizar la calidad de los datos registrados.

b. Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Un sistema de posicionamiento global de alta precisión es un componente absolutamente indispensable para la generación de mapas de rendimiento espacialmente confiables. El receptor GPS proporciona las coordenadas geográficas exactas latitud y longitud de la cosechadora en cada instante, permitiendo asociar cada medición de rendimiento con su ubicación precisa dentro del campo. Idealmente,

estos sistemas deben contar con correcciones diferenciales o tecnología RTK, que permiten alcanzar precisiones sub métricas o centimétricas. La exactitud del posicionamiento es determinante para la calidad espacial del mapa, ya que errores en la localización pueden generar desplazamientos o distorsiones en los patrones de rendimiento interpretados.

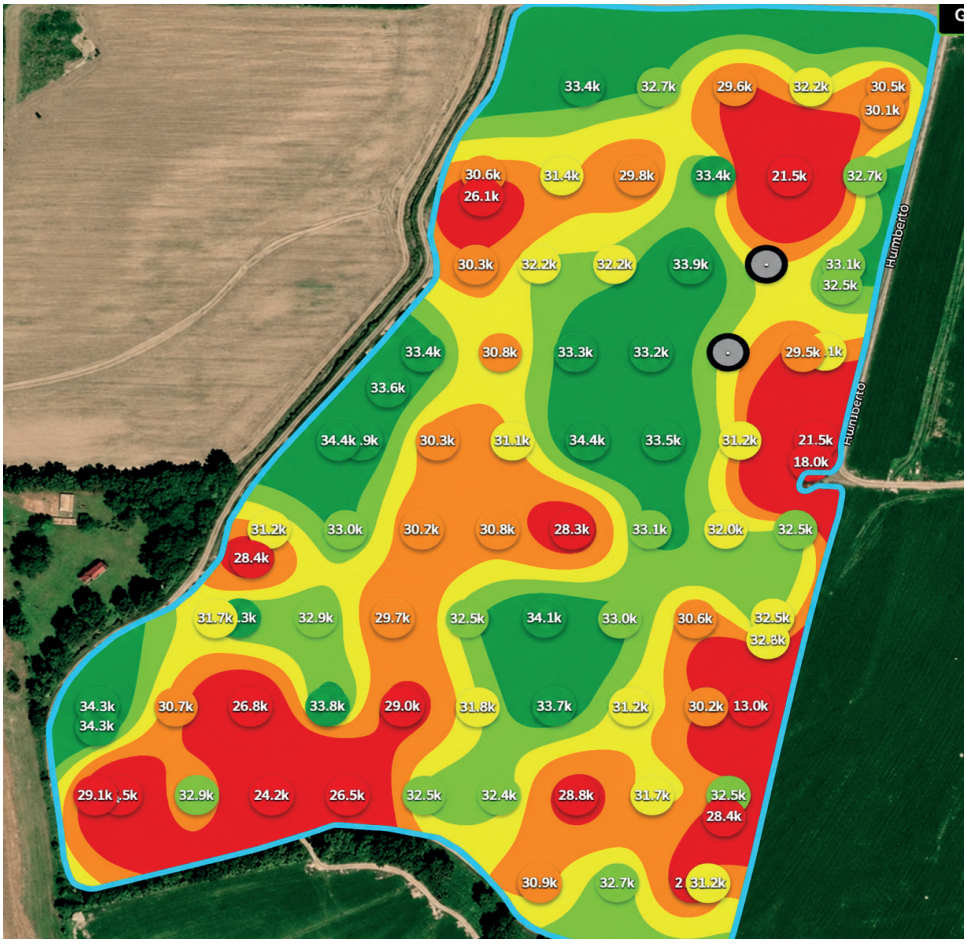
c. Software de mapeo (GIS): Una vez que los datos de rendimiento y posicionamiento han sido recopilados y almacenados por el monitor de la cosechadora, estos se descargan para su procesamiento posterior. Tradicionalmente, esta transferencia se realiza mediante dispositivos de almacenamiento extraíbles, como memorias USB, aunque cada vez es más común el uso de plataformas en la nube que permiten la transmisión inalámbrica directa de los datos. Posteriormente, la información es procesada en software especializado de SIG o en plataformas de gestión agrícola digital. Este software cumple un papel central al ejecutar una serie de operaciones críticas para la construcción del mapa de rendimiento.

- Limpieza de datos: La limpieza de datos consiste en la identificación y eliminación de registros anómalos o erróneos que podrían distorsionar la interpretación del mapa final. Estas anomalías suelen presentarse al inicio y al final de las pasadas de cosecha, durante las maniobras en las cabeceras del lote, o cuando la cosechadora se detiene temporalmente, situaciones en las que las lecturas de flujo y velocidad pueden no ser representativas del rendimiento real.

- Interpolación: Dado que los monitores de rendimiento registran datos en puntos discretos a lo largo de la trayectoria de la cosechadora, el software de mapeo emplea algoritmos de interpolación geoestadística para estimar los valores de rendimiento en las áreas no muestreadas directamente. Este proceso permite transformar los datos

puntuales en una superficie continua de rendimiento, facilitando la visualización coherente de la variabilidad espacial del cultivo y la identificación de patrones productivos dentro del lote (Ver figura 4).

Figura 4. *mapa de rendimiento de maíz en Kg*



Fuente: Esta investigación

La imagen ilustra un mapa de rendimiento de un cultivo de maíz, en el cual los valores productivos se expresan en kilogramos (kg) y se presentan espacialmente distribuidos sobre una imagen satelital de fondo. Los límites del campo agrícola se encuentran claramente delimitados mediante un contorno de color azul claro, lo que facilita la referencia espacial y la identificación precisa del área de análisis. Esta superposición entre datos productivos y base cartográfica permite contextualizar el rendimiento del cultivo en relación con la forma, extensión y entorno del lote.

El campo se encuentra segmentado en múltiples zonas diferenciadas, representadas mediante una escala cromática gradual que refleja distintos niveles de productividad. En este esquema, las zonas de alto rendimiento se identifican con tonalidades verdes, las zonas de rendimiento intermedio con colores amarillos y las zonas de bajo rendimiento con tonalidades rojas. Cada una de estas áreas incluye valores numéricos expresados en miles de kilogramos (por ejemplo, “33.4k”, equivalente a 33.400 kg), lo que permite una lectura cuantitativa directa del desempeño productivo en cada subzona del lote.

Los valores de rendimiento observados evidencian una marcada heterogeneidad espacial dentro de la parcela. En las áreas de mayor productividad, representadas en verde, se registran valores elevados que alcanzan aproximadamente 39.9k (39.900 kg) y 37.7k (37.700 kg), lo que sugiere condiciones edáficas, hídricas o de manejo altamente favorables para el cultivo. En contraste, las zonas de bajo rendimiento, destacadas en rojo, presentan valores significativamente menores, como 21.5k (21.500 kg), 18.0k (18.000 kg) e incluso 13.0k (13.000 kg), lo que indica la presencia de limitantes productivas que pueden estar asociadas a factores como deficiencias nutricionales, compactación del suelo, estrés hídrico, problemas de drenaje o variaciones en la textura del suelo.

Entre estos extremos se identifican zonas de rendimiento intermedio, representadas en amarillo, con valores cercanos a 29.8k (29.800 kg) y 34.1k (34.100 kg), las cuales actúan como áreas de transición y refuerzan la idea

de que el rendimiento no es homogéneo, sino el resultado de múltiples interacciones espaciales entre suelo, clima y prácticas de manejo. En conjunto, este mapa de rendimiento constituye una herramienta clave para la agricultura de precisión, ya que permite identificar zonas homogéneas de manejo, orientar la toma de decisiones sitio-específicas y servir como base para la integración con información de suelo, teledetección y parcelas de calibración, con el objetivo de optimizar la productividad y la eficiencia del sistema agrícola.

2.3.2 Proceso de generación paso a paso

El proceso de generación de un mapa de rendimiento es secuencial y requiere la ejecución meticulosa de una serie de pasos para garantizar la precisión y la utilidad agronómica de la información resultante.

1. Instalación y configuración: El monitor de rendimiento y el receptor GPS deben instalarse con precisión en la cosechadora. Posteriormente, se configuran los parámetros específicos del cultivo a cosechar (por ejemplo, tipo de grano y humedad objetivo para el ajuste del rendimiento) y, de manera fundamental, se realiza la calibración del monitor. La calibración es un paso crítico y debe ejecutarse con rigor, generalmente mediante la cosecha de una porción pequeña del lote con área conocida, el pesaje manual y exacto del grano recolectado y el ajuste posterior de las lecturas del monitor hasta que coincidan con el valor real verificado. Este procedimiento establece la base de exactitud sobre la que se construye toda la cartografía de rendimiento.

2. Recolección de datos durante la cosecha: A medida que la cosechadora avanza a través del campo, el monitor registra en tiempo real un conjunto de variables que, integradas, permiten calcular el rendimiento instantáneo para cada punto georreferenciado. Entre las variables registradas se incluyen:

- el flujo de grano (expresado como masa por unidad de tiempo, por ejemplo, kg/s o lb/s);
- la humedad del grano (en %);
- la velocidad de avance de la cosechadora (km/h o mph);
- la ubicación geográfica precisa (latitud y longitud) a través del sistema GPS;
- el ancho activo del cabezal.

Con esta información integrada, el sistema estima el rendimiento instantáneo (por ejemplo, t/ha o bushels/acre) y lo asocia a coordenadas específicas, generando el conjunto de datos que posteriormente se transformará en el mapa.

3. Transferencia de datos: Una vez finalizada la cosecha, los datos geoespaciales registrados se transfieren desde la memoria del monitor a un computador para su procesamiento. Esta transferencia puede realizarse mediante medios físicos, como memorias USB o tarjetas SD, o mediante mecanismos más recientes de transferencia inalámbrica hacia plataformas de gestión agrícola basadas en la nube, lo que facilita la consolidación, el almacenamiento y el análisis de la información.

4. Procesamiento y análisis en software: Una vez descargados, los datos se procesan en un software SIG o en una plataforma de agricultura de precisión. Este procesamiento incluye varias etapas críticas:

- Importación: los datos se cargan al software o plataforma seleccionada.

- Limpieza y filtrado: se identifican y eliminan valores atípicos o erróneos que pueden distorsionar el mapa, como lecturas con rendimiento cero o anormalmente bajo registradas cuando se levanta el cabezal, o valores inconsistentes durante giros en cabecera o detenciones.

- Generación del mapa: el software utiliza algoritmos de interpolación y/o procedimientos geoestadísticos para convertir los puntos georreferenciados depurados en una superficie continua de rendimiento. Esta superficie se representa mediante una escala de colores que resalta zonas de alta, media y baja productividad, facilitando la interpretación espacial.

- Análisis adicional: el mapa de rendimiento puede superponerse con otras capas de información, como mapas de suelo, imágenes satelitales de diferentes fechas, mapas de aplicación de fertilizantes o herbicidas, topografía u otros insumos. Esta integración permite identificar correlaciones y patrones consistentes, ayudando a comprender las causas subyacentes de la variabilidad del rendimiento y fortaleciendo la toma de decisiones agronómicas.

A pesar de su alto valor agronómico, la generación de mapas de rendimiento implica desafíos técnicos y operativos que deben ser gestionados cuidadosamente:

- Calibración: una calibración incorrecta del monitor de rendimiento constituye la principal fuente de error y puede producir mapas engañosos, conduciendo a decisiones agronómicas equivocadas.

- Condiciones de cosecha: variables como la velocidad de avance, la topografía (pendientes), o condiciones del cultivo (por ejemplo, acame o versado) pueden afectar la estabilidad del flujo de grano y la calidad de la lectura del monitor.

- Mantenimiento del equipo: sensores sucios, desajustados o con fallas generan datos poco fiables, lo que evidencia la necesidad de mantenimiento preventivo y verificación periódica del sistema.

- Interpretación: la lectura correcta del mapa requiere criterio agronómico y conocimiento del lote, además de la capacidad de integrar el mapa con información contextual (suelo, clima, manejo, historia del cultivo) para explicar la variabilidad observada y plantear estrategias eficaces.

La generación de mapas de rendimiento es una práctica fundamental e irremplazable dentro de la agricultura de precisión moderna. Esta herramienta proporciona una visión espacial detallada de la productividad del campo, permitiendo identificar patrones, delimitar zonas de manejo y sustentar decisiones más eficientes y rentables, con un enfoque de mejora continua y sostenibilidad del sistema productivo.

3. Correlación de rendimiento con otros atributos

En el contexto de la agricultura de precisión, la correlación del rendimiento con otros atributos constituye el paso metodológico clave que permite trascender la mera visualización de datos georreferenciados y transformarlos en conocimiento agronómico verdaderamente accionable. No basta con identificar espacialmente dónde el rendimiento es alto o bajo; resulta indispensable comprender de manera rigurosa por qué se presentan dichas variaciones dentro del campo. Este entendimiento causal es el que habilita a los agricultores y técnicos a formular decisiones estratégicas basadas en evidencia, orientadas a optimizar la producción, mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y reducir costos e impactos ambientales.

La correlación de rendimiento con otros atributos hace referencia al proceso analítico y estadístico mediante el cual se examinan las relaciones existentes entre el rendimiento del cultivo considerado como la variable dependiente, es decir, el resultado que se desea explicar y un

conjunto de características del sistema agrícola que actúan como variables independientes. Estas variables pueden incluir propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, condiciones climáticas, información derivada de la teledetección, así como prácticas de manejo implementadas a lo largo del ciclo productivo. El objetivo central de este análisis es identificar patrones espaciales y temporales consistentes, establecer relaciones estadísticas significativas y comprender los efectos directos o indirectos que estos atributos ejercen sobre el rendimiento del cultivo, proporcionando así una base sólida para la gestión diferenciada y la toma de decisiones sitio-específicas.

3.1 Atributos comunes para la correlación

En el contexto de la agricultura de precisión, la correlación del rendimiento con otros atributos constituye el paso metodológico clave que permite trascender la mera visualización de datos georreferenciados y transformarlos en conocimiento agronómico verdaderamente accionable. No es suficiente identificar espacialmente dónde el rendimiento es alto o bajo; resulta indispensable comprender de manera rigurosa por qué se presentan dichas variaciones dentro del campo. Este entendimiento causal es el que habilita a agricultores y técnicos a formular decisiones estratégicas basadas en evidencia, orientadas a optimizar la producción, mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y reducir costos e impactos ambientales.

La correlación de rendimiento con otros atributos se refiere al proceso analítico y estadístico mediante el cual se examinan las relaciones existentes entre el rendimiento del cultivo, considerado como la variable dependiente (el resultado que se desea explicar), y un conjunto de características del sistema agrícola que actúan como variables independientes. Estas variables pueden corresponder a propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, condiciones climáticas, información derivada de la teledetección o prácticas de manejo implementadas a lo largo del ciclo productivo. El objetivo central de este análisis es identificar patrones espaciales y temporales consistentes, establecer relaciones estadísticas significativas y comprender los efectos

directos o indirectos que estos atributos ejercen sobre el rendimiento del cultivo, proporcionando una base sólida para la gestión diferenciada y la toma de decisiones sitio-específicas.

Los atributos que se correlacionan con el rendimiento pueden clasificarse en varias categorías fundamentales, cada una de las cuales aporta una capa de información crítica para la comprensión integral del funcionamiento del sistema agrícola, como se puede ver en la tabla 3.

Tabla 3. *Atributos correlacionados con el rendimiento del cultivo en Agricultura de precisión*

Categoría principal	Subcategoría	Atributo específico	Descripción técnica	Influencia sobre el rendimiento
A. Atributos del suelo	Propiedades físicas	Textura (arena, limo, arcilla)	Determina retención de agua, drenaje, aireación y penetración radicular.	Define disponibilidad hídrica y desarrollo radicular.
		Materia orgánica (MO)	Mejora estructura, retención de agua y nutrientes, y actividad microbiana.	Incrementa fertilidad y resiliencia del suelo.
		Densidad aparente	Indicador de compactación y porosidad.	Compactación reduce crecimiento radicular y absorción.
		Conductividad eléctrica (CE)	Asociada a salinidad y textura del suelo.	Alta salinidad puede reducir productividad.

Categoría principal	Subcategoría	Atributo específico	Descripción técnica	Influencia sobre el rendimiento
		Profundidad efectiva	Volumen útil de enraizamiento.	Limita acceso a agua y nutrientes en suelos someros.
		Estructura del suelo	Grado de agregación y porosidad.	Influye en infiltración y aireación.
	Propiedades químicas	pH	Determina disponibilidad de nutrientes.	Valores extremos limitan absorción.
		Macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S)	Elementos requeridos en grandes cantidades.	Deficiencias reducen crecimiento y rendimiento.
		Micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl)	Elementos traza esenciales.	Impactan procesos fisiológicos clave.
		Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Capacidad del suelo para retener cationes.	Determina almacenamiento y suministro nutricional.

Categoría principal	Subcategoría	Atributo específico	Descripción técnica	Influencia sobre el rendimiento
	Propiedades hídricas	Contenido de humedad	Agua presente en el perfil.	Directamente relacionada con estrés hídrico.
		Capacidad de retención de agua	Máxima cantidad de agua almacenada.	Base para progra mación eficiente del riego.
B. Atributos topográficos		Elevación	Relacionada con temperatura y riesgo de heladas.	Afecta microclima y crecimiento.
		Pendiente	Influye en escurrimiento y erosión.	Puede generar pérdidas de suelo y nutrientes.
		Orientación (aspecto)	Determina exposición solar.	Modifica evapotranspiración y temperatura.
		Curvatura	Controla acumula-ción o evacuación de agua.	Influye en humedad del perfil.

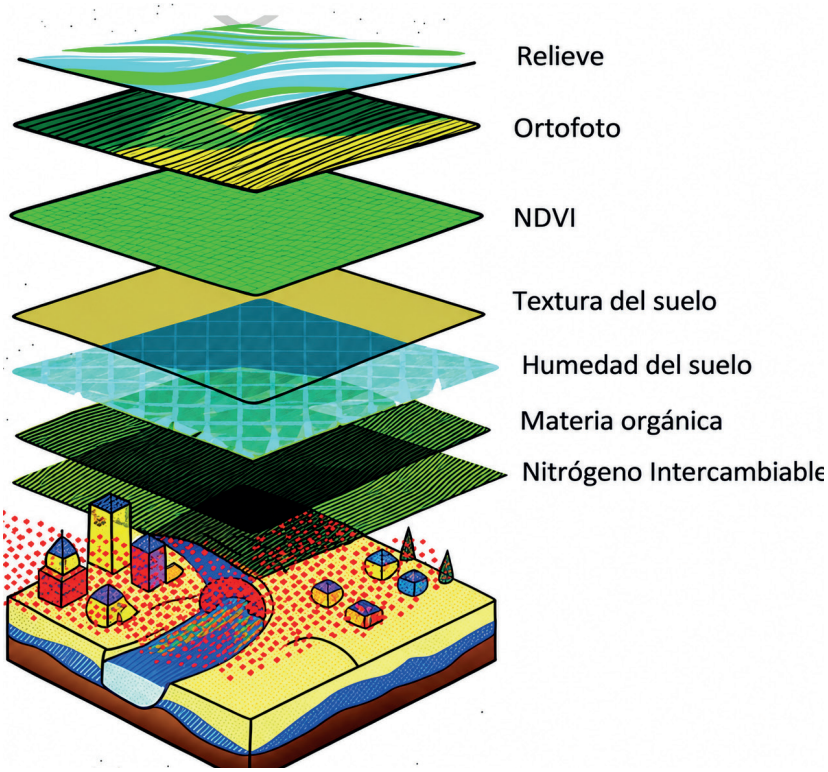
Categoría principal	Subcategoría	Atributo específico	Descripción técnica	Influencia sobre el rendimiento
C. Atributos vegetales (teledetección)	Ninguna	Índices de vegetación (NDVI, EVI, GCI)	Indicadores de vigor, biomasa y clorofila.	Predicen rendimiento potencial.
		Imágenes multiespectrales/hiperespectrales	Detectan estrés hídrico, nutricional o sanitario.	Permiten diagnóstico temprano.
		Altura del cultivo (LiDAR/fotogrametría)	Estimación estructural del dosel.	Correlacionada con vigor y productividad.
D. Atributos de manejo	Ninguna	Dosis de semilla	Densidad de siembra aplicada.	Influye en competencia intraespecífica.
		Dosis de fertilizantes (NPK)	Cantidad y tipo de nutrientes aplicados.	Determina potencial productivo.
		Aplicación de agroquímicos	Distribución de herbicidas, fungicidas e insecticidas.	Controla pérdidas por estrés biótico.

Categoría principal	Subcategoría	Atributo específico	Descripción técnica	Influencia sobre el rendimiento
		Labranza (tipo/ profundidad)	Impacta estructura y compactación.	Afecta infiltración y desarrollo radicular.
		Fechas de siembra/ cosecha	Ajuste a ventanas óptimas.	Influye en eficiencia fisiológica.
		Sistema de riego	Uniformidad y lámina aplicada.	Determina balance hídrico del cultivo.
E. Atributos bióticos/abióticos (campo)	Ninguna	Presencia de plagas/ enfermedades	Mapeo de focos afectados.	Reduce rendimiento si no se controla.
		Daños por malezas	Competencia por luz, agua y nutrientes.	Disminuye eficiencia productiva.
		Anegamiento/sequía localizada	Estrés hídrico por exceso o déficit.	Afecta fisiología y rendimiento.
		Compactación del suelo	Evaluada con penetrómetro.	Limita desarrollo radicular y absorción.

Fuente: esta Investigación.

La imagen visualiza la superposición de mapas de múltiples variables para analizar su correlación con el rendimiento del cultivo. Este enfoque ilustra cómo diferentes capas de información geoespacial como tipo de suelo, pH, nutrientes o índices de vegetación pueden integrarse y analizarse conjuntamente con el mapa de rendimiento. La superposición permite identificar patrones espaciales y relaciones consistentes entre la productividad y los atributos del suelo o del cultivo, constituyéndose en una herramienta fundamental para el diagnóstico agronómico y la formulación de estrategias de manejo diferenciado en la agricultura de precisión (ver figura 5).

Figura 5. *Superposición de mapas de variables para determinación de correlación con el rendimiento.*



Fuente: esta investigación

3.2 Proceso de correlación

El proceso de correlación de rendimiento con otros atributos generalmente sigue una serie de pasos sistemáticos y lógicos:

1. Recopilación de Datos Georreferenciados: Este paso inicial implica la recolección de diversas capas de información espacialmente referenciada:

    - Mapa de Rendimiento: Constituye la base fundamental del análisis, siendo generado típicamente al final de la temporada de crecimiento del cultivo.

    - Mapas de Suelo: Basados en muestreo de suelo por zonas de manejo o mediante muestreo densificado, estos mapas proporcionan información sobre propiedades como el pH, el contenido de materia orgánica, la concentración de nutrientes específicos y la CEa.

    - Mapas de Topografía: Generados a partir de datos GPS RTK de alta precisión o de Modelos Digitales de Elevación (MDE), que describen la elevación, pendiente y orientación del terreno.

    - Mapas de Teledetección: Imágenes satelitales o de drones adquiridas en diferentes momentos clave del ciclo fenológico del cultivo, que proporcionan información sobre índices de vegetación, vigor y estrés.

    - Mapas de Aplicación: Registros detallados de dónde y en qué cantidad se aplicó cada insumo (semillas, fertilizantes, agroquímicos).

    - Observaciones de Campo: Puntos georreferenciados que documentan la ocurrencia de problemas específicos (plagas, enfermedades, anegamiento) o características agronómicas particulares.

2. Integración de Datos (GIS): Todas estas capas de información heterogénea deben ser georreferenciadas con precisión y alineadas en un software de GIS. Esta integración permite la superposición visual y analítica de los mapas, facilitando la extracción de los valores de cada atributo para cada punto o celda de la cuadrícula virtual que representa el campo. La capacidad de integrar múltiples capas de datos es un pilar fundamental de los análisis de agricultura de precisión.

3. Análisis Estadístico: Una vez que los datos han sido integrados espacialmente, se aplican diversas técnicas de análisis estadístico para cuantificar las relaciones y los patrones:

    - Análisis Visual: La superposición gráfica de mapas es el primer paso exploratorio. Por ejemplo, superponer un mapa de rendimiento con un mapa de pH del suelo puede revelar visualmente si las zonas de bajo pH coinciden espacialmente con zonas de bajo rendimiento, sugiriendo una posible relación causal.

    - Análisis de Regresión: Métodos estadísticos avanzados, como la regresión lineal múltiple o la regresión geoestadística, pueden cuantificar la relación entre el rendimiento (variable dependiente) y múltiples atributos (variables independientes) de forma simultánea. Esto permite determinar cuáles atributos son los más influyentes en la variabilidad del rendimiento y en qué medida contribuyen.

    - Análisis de Componentes Principales (PCA): Esta técnica multivariada ayuda a reducir la dimensionalidad de grandes conjuntos de datos complejos, identificando los atributos más importantes y aquellos que explican la mayor parte de la variabilidad observada en el rendimiento, simplificando el análisis.

- Mapas de Zonas de Manejo: Basándose en los atributos que demuestran una fuerte correlación estadística y espacial con el rendimiento, el campo puede ser dividido en zonas de manejo homogéneas. Cada una de estas zonas se caracteriza por propiedades similares y, por ende, requiere un manejo agronómico diferenciado y optimizado.

4. Importancia y aplicaciones prácticas

La correlación de rendimiento con otros atributos es, en última instancia, el motor que impulsa la toma de decisiones informadas y la optimización de las operaciones en la agricultura de precisión:

1. Identificación de Factores Limitantes: Permite identificar con precisión milimétrica qué factores específicos están limitando el potencial de rendimiento en cada parte del campo. Por ejemplo, si un bajo rendimiento se correlaciona fuertemente con un pH bajo y altos niveles de aluminio tóxico en el suelo, la solución agronómica más efectiva podría ser la aplicación localizada de cal para corregir la acidez.

2. Optimización del Uso de Insumos: Una vez que se comprenden las causas subyacentes de la variabilidad del rendimiento, se pueden generar mapas de prescripción precisos y específicos para cada zona de manejo.

   - Fertilización Variable: Consiste en aplicar más fertilizante en las zonas del campo donde el suelo lo necesita y donde el cultivo tiene el potencial de responder productivamente, y menos en las áreas donde no es necesario o donde las limitaciones del suelo (ej., compactación severa) impiden una respuesta favorable.

   - Densidad de Siembra Variable: Permite ajustar la población de plantas a la capacidad productiva inherente de cada zona de manejo, maximizando la eficiencia en el uso de semillas.

- Riego Variable: La aplicación de agua se ajusta a las necesidades hídricas específicas de cada zona, basándose en la capacidad de retención de agua del suelo y en el estrés hídrico real detectado en el cultivo, minimizando el desperdicio.

3. Gestión Dirigida de Problemas: Permite direccionar los esfuerzos de manejo y las intervenciones agronómicas de manera eficiente a las áreas problemáticas específicas. Por ejemplo, si un bajo rendimiento se correlaciona consistentemente con la compactación del suelo, se pueden programar labores de subsolado o descompactación solo en esas zonas afectadas, optimizando el uso de maquinaria y combustible.

4. Toma de Decisiones de Larga Duración: Ayuda a planificar inversiones estratégicas a largo plazo, como la instalación de sistemas de drenaje, la mejora de sistemas de riego o la aplicación de enmiendas de suelo (ej., yeso agrícola, materia orgánica) para mejorar permanentemente la productividad de las áreas históricamente de bajo rendimiento.

5. Evaluación de la Eficiencia: Proporciona un marco robusto para evaluar la eficiencia y el impacto de las prácticas agrícolas implementadas. Si una nueva estrategia de fertilización variable no produce la mejora esperada en el rendimiento de las zonas objetivo, el análisis de correlación puede ayudar a identificar por qué no se logró el resultado deseado, permitiendo ajustes futuros.

6. Desarrollo de Modelos Predictivos: Los datos generados a través del análisis de correlación son esenciales para el entrenamiento y la validación de modelos agronométricos avanzados. Estos modelos pueden predecir el rendimiento del cultivo basándose en una combinación de factores ambientales (condiciones del suelo y clima) y de manejo, mejorando la capacidad predictiva de los sistemas de soporte a la decisión.

Ejemplo práctico

Imaginemos un productor de papa en Nariño que tiene un mapa de rendimiento. Nota que hay zonas de bajo rendimiento consistentemente.

Paso 1: Superposición Visual. El agricultor superpone el mapa de rendimiento con:

- Un mapa de pH del suelo: Observa que las zonas de bajo rendimiento coinciden con suelos ácidos (pH bajo).
- Un mapa topográfico: Ve que estas zonas están en las partes más bajas del campo, susceptibles a anegamiento.
- Imágenes NDVI de mitad de temporada: Las zonas de bajo rendimiento muestran bajo vigor en la planta.

Paso 2: Análisis Estadístico. Un análisis de regresión múltiple podría confirmar que el pH bajo y el anegamiento son los factores que más explican la variabilidad del rendimiento.

Paso 3: Decisiones Accionables.

- Para el pH bajo: Se prescriben aplicaciones de cal agrícola variables, concentrando la cal en las zonas más ácidas.
- Para el anegamiento: Se planifica la instalación de drenajes superficiales o subsuperficiales en las zonas bajas para mejorar el escurrimiento del agua.
- Para la fertilización: Basado en el potencial real del suelo y no en una aplicación uniforme, se ajustan las dosis de nutrientes.

La correlación de rendimiento con otros atributos es, por lo tanto, el puente entre la recolección de datos y la inteligencia agrícola. Es lo que permite pasar del "dónde" al "por qué", y de ahí al "cómo" y "cuánto" se debe intervenir para lograr una agricultura más eficiente y productiva.

5. Ajustes para el próximo ciclo agrícola.

Los ajustes para el próximo ciclo agrícola representan la fase culminante y, sin lugar a dudas, la etapa más crítica en la implementación de la agricultura de precisión. Es en este punto donde la vasta cantidad de información recopilada a lo largo del ciclo anterior, los mapas temáticos generados y los análisis geoespaciales realizados se transforman en decisiones concretas y accionables que guiarán la estrategia de manejo para la siguiente temporada de siembra. Este paso esencial no solo cierra el "bucle" metodológico de la agricultura de precisión, sino que también establece un flujo de retroalimentación donde la experiencia y los datos del ciclo fenológico precedente nutren directamente la planificación estratégica del ciclo subsecuente. El objetivo primordial de este enfoque es la búsqueda incesante de una mejora continua en la productividad del sistema, la eficiencia en el uso de los recursos y la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

5.1 ¿Por qué son cruciales los ajustes?

Los ajustes agronómicos no deben ser concebidos meramente como una repetición simplificada de prácticas exitosas anteriores. Por el contrario, constituyen un proceso dinámico e iterativo que busca optimizar la gestión del cultivo basándose en la interpretación de datos reales, empíricos y en análisis profundos de la variabilidad espacial y temporal del campo. Su importancia intrínseca radica en diversos aspectos fundamentales:

- Maximizar el rendimiento y la rentabilidad: La identificación precisa de las prácticas agronómicas o los insumos específicos que contribuyeron a un mejor rendimiento en el ciclo anterior permite

la formulación de estrategias para replicarlos o mejorarlos de forma adaptada a las condiciones locales. Esto se traduce directamente en un incremento del potencial productivo y, consecuentemente, en una mejora sustancial de la rentabilidad económica de la explotación agrícola.

- Optimizar el uso de recursos: Mediante la aplicación de principios de tasa variable derivados de los ajustes, se logra una significativa reducción del desperdicio de insumos clave como fertilizantes, agua, semillas y agroquímicos. Al aplicar la cantidad justa y necesaria, únicamente donde y cuando se requiere, se minimizan los excesos y las deficiencias, contribuyendo a una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales y económicos.

- Mitigar riesgos agrícolas: El análisis retrospectivo de los problemas fitosanitarios (enfermedades, plagas), los eventos de estrés hídrico (sequía o anegamiento) o las deficiencias nutricionales que afectaron el ciclo anterior, proporciona información valiosa para planificar e implementar medidas preventivas o correctivas de forma proactiva. Esto reduce la vulnerabilidad del sistema productivo a futuras contingencias.

- Promover la sostenibilidad ambiental: Al optimizar el uso de insumos y mitigar el impacto de las prácticas agrícolas, los ajustes contribuyen activamente a fomentar prácticas agrícolas más sostenibles. Esto incluye la reducción de la lixiviación de nutrientes hacia cuerpos de agua, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y el uso más eficiente del recurso hídrico, protegiendo así el medio ambiente y los ecosistemas circundantes.

- Mejora continua del sistema productivo: Cada ciclo agrícola es concebido como un experimento a gran escala, generando un caudal de datos valiosos que, al ser analizados, permiten afinar y perfeccionar las estrategias de manejo para los ciclos futuros.

Este enfoque de aprendizaje iterativo garantiza una adaptación constante y una resiliencia agronómica creciente frente a las condiciones cambiantes.

5.2 Proceso de ajustes para el próximo ciclo agrícola

El proceso metodológico de ajustes se fundamenta en la integración holística y el análisis exhaustivo de la información geoespacial y agronómica generada en las etapas previas de la agricultura de precisión.

1. Revisión y Análisis de los Mapas de Rendimiento:

   - Identificación de Patrones Espaciales y Temporales: Se examinan los mapas de rendimiento históricos, a menudo de varios años, para identificar si existen zonas que consistentemente exhiben alto o bajo rendimiento productivo. La persistencia de patrones espaciales de rendimiento a lo largo del tiempo es un indicador robusto de factores limitantes o favorables de naturaleza edáfica o topográfica.

   - Análisis Causal de Variaciones: Se investiga rigurosamente qué factores específicos (tales como propiedades del suelo, atributos topográficos, decisiones de manejo, incidencia de plagas o enfermedades, etc.) se correlacionaron estadísticamente y espacialmente con las variaciones observadas en el rendimiento. Este análisis permite establecer relaciones causa-efecto.

   - Evaluación de Pruebas en Franjas/Parcelas de Calibración: Si durante el ciclo anterior se implementaron ensayos experimentales con dosis variables de insumos o se evaluaron diferentes variedades de cultivo en franjas o parcelas de calibración, se analizan los resultados obtenidos y se cuantifica su impacto directo en el rendimiento productivo. Esto provee una validación empírica de las hipótesis de manejo.

2. Integración de Datos de Múltiples Fuentes: Para una comprensión integral, es crucial integrar información de diversas capas de datos georreferenciados:

    - Mapas de Suelo: Se analizan los cambios en los niveles de nutrientes, el pH y el contenido de materia orgánica. Se evalúa la necesidad de realizar nuevos muestreos de suelo o de planificar la aplicación de enmiendas específicas (como cal agrícola) para corregir desequilibrios químicos.

    - Imágenes de Teledetección (NDVI, etc.): Se revisa la evolución del vigor vegetativo del cultivo a lo largo de todo el ciclo mediante índices de vegetación. Esto permite identificar zonas que experimentaron estrés recurrente (hídrico, nutricional o biótico) en momentos críticos del desarrollo.

    - Datos Climáticos: Se correlaciona el rendimiento obtenido con variables climáticas clave como la precipitación acumulada, las temperaturas medias y extremas, y las horas de sol durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Se analiza cómo las condiciones climáticas extremas pudieron haber afectado diferencialmente las distintas zonas del campo.

    - Registros de Manejo: Se analizan de forma sistemática los datos históricos de siembra (fecha, densidad), fertilización (dosis, momentos de aplicación), riego (cantidad, frecuencia) y aplicación de agroquímicos, para identificar patrones y correlaciones con el rendimiento.

3. Identificación y Redefinición de Zonas de Manejo Homogéneas:

    - Basándose en el análisis de correlación de rendimiento con los atributos edáficos, topográficos y de manejo, se pueden redefinir o ajustar con mayor precisión las zonas de manejo dentro del campo. Estas zonas constituyen áreas con características

intrínsecas similares (como potencial de rendimiento, tipo de suelo dominante, o la presencia de problemas específicos recurrentes) que, por lo tanto, se gestionarán de forma diferenciada en el próximo ciclo agrícola.

4. Generación de Mapas de Prescripción (Recetas Agrícolas):

   - Este es el producto final y tangible de la fase de ajustes. Los mapas de prescripción son documentos cartográficos digitales que indican las dosis de insumos o las acciones agronómicas específicas que deben realizarse en cada micro-zona delimitada del campo.

   - Prescripción de Siembra Variable: Recomienda diferentes densidades de siembra para optimizar la población de plantas según el potencial de rendimiento de cada zona (por ejemplo, mayor densidad en zonas de alto potencial, y una menor densidad en zonas limitantes para evitar el estrés por competencia).

   - Prescripción de Fertilización Variable: Indica la cantidad precisa de cada nutriente esencial (nitrógeno, fósforo, potasio, micronutrientes) que debe aplicarse en cada zona, fundamentándose en los análisis de suelo recientes, el potencial de rendimiento esperado y las necesidades nutricionales específicas del cultivo.

   - Prescripción de Riego Variable: Define la cantidad de agua a aplicar en diferentes secciones del campo, considerando la capacidad de retención de agua de los diferentes tipos de suelo y las demandas hídricas del cultivo en sus diversas etapas fenológicas.

   - Prescripción de Aplicación de Agroquímicos: Dirige la aplicación de herbicidas, fungicidas o insecticidas únicamente a las áreas problemáticas identificadas, optimizando el uso de productos fitosanitarios y reduciendo su impacto ambiental al minimizar las aplicaciones innecesarias.

- Prescripción de Labores Culturales: Puede indicar zonas específicas que requieren labores de labranza focalizadas (ejemplo, subsolado en áreas compactadas) o mejoras en los sistemas de drenaje para corregir problemas de encharcamiento.

5. Planificación de Pruebas y Ensayos para el Próximo Ciclo:

   - Incluso con la riqueza de datos históricos y los análisis avanzados, el sector agrícola siempre presenta oportunidades para el aprendizaje y la innovación. Por ello, es estratégico planificar nuevas parcelas de calibración o franjas de prueba experimentales para el próximo ciclo. Estas podrían enfocarse en evaluar nuevas variedades de cultivos, diferentes dosis de insumos en zonas específicas del campo, o la introducción de nuevas tecnologías y prácticas de manejo. Esto asegura que el ciclo de mejora continua permanezca activo y que la capacidad de adaptación de la explotación agrícola se refuerce constantemente.

6. Carga de las Prescripciones a la Maquinaria Agrícola:

   - Los mapas de prescripción generados en formato digital se cargan directamente en los controladores electrónicos de la maquinaria agrícola moderna, tales como sembradoras, pulverizadoras, fertilizadoras o equipos de riego. Estos equipos deben estar dotados con tecnología de VTR.

   - El sistema GPS integrado en la maquinaria lee continuamente su posición geográfica en el campo, y el controlador electrónico ajusta automáticamente y en tiempo real la tasa de aplicación del insumo o la intensidad de la labor según el valor prescrito en el mapa digital para esa ubicación exacta. Esto permite una implementación precisa y automatizada de las decisiones de manejo diferenciado.

5.3 Ejemplos específicos de ajustes

Para un agricultor en la región de Nariño, Colombia, que cultiva especies como papa, pastos (para ganadería) o cebada, los ajustes derivados de la agricultura de precisión podrían manifestarse en ejemplos concretos como los siguientes:

- Manejo de la acidez del suelo: Si los mapas de rendimiento de ciclos anteriores demuestran una correlación negativa y consistente entre las zonas de bajo pH del suelo y un rendimiento productivo reducido, el ajuste para el próximo ciclo implicaría la modificación del mapa de prescripción de cal agrícola. Este nuevo mapa indicaría la aplicación de dosis más elevadas de correctivos de acidez específicamente en esas áreas identificadas antes de la siembra, optimizando la disponibilidad de nutrientes para el cultivo.

- Fertilización fosfórica localizada: Si los análisis de suelo geoespaciales revelan una deficiencia de fósforo en ciertas laderas o micro-topografías del terreno, el mapa de prescripción de fertilizante fosfórico se ajustaría para incrementar la dosis aplicada precisamente en esas zonas carentes. Concomitantemente, en áreas con suelos que ya presentan altos niveles de fósforo, se podría reducir la dosis, evitando el desperdicio y la potencial contaminación ambiental.

- Drenaje en zonas bajas propensas a encharcamiento: Si se observa una coincidencia persistente entre las zonas de bajo rendimiento y áreas topográficamente bajas propensas a encharcamientos o anegamiento (un problema común en el altiplano de Nariño), los ajustes podrían incluir la planificación e implementación de zanjas de drenaje superficial o la instalación de sistemas de drenaje subterráneo en esas áreas específicas antes de la siembra del próximo ciclo o durante una ventana de trabajo adecuada.

- Densidad de siembra de papa variada: En las laderas con suelos más delgados, menor profundidad efectiva y una capacidad de retención de agua limitada, el mapa de prescripción de siembra podría ajustarse para utilizar una menor densidad de tubérculos-semilla de papa, evitando el estrés por competencia. Por el contrario, en suelos más fértiles y profundos con mayor potencial productivo, se podría prescribir un aumento en la densidad de siembra para maximizar el rendimiento.

- Control fitosanitario específico (Ej. Tizón Tardío en Papa): Si en un ciclo agrícola anterior se mapearon focos específicos de incidencia de tizón tardío (Phytophthora infestans) en el cultivo de papa, el mapa de prescripción de fungicida para el próximo ciclo podría enfocarse preventivamente y de forma dirigida en esas áreas históricamente afectadas. Esto implicaría una aplicación anticipada o una adaptación del momento y la dosis de aplicación para interrumpir el ciclo de la enfermedad de manera más eficiente.

Los ajustes para el próximo ciclo agrícola no deben ser concebidos como un evento aislado y discreto, sino como una fase integral de un ciclo continuo de aprendizaje, adaptación y optimización en la agricultura de precisión. Cada campaña de cosecha y el subsiguiente análisis de datos proporcionan nuevas perspectivas y conocimientos que se incorporan directamente en la estrategia de manejo del año venidero. Este enfoque iterativo es lo que faculta a los agricultores de precisión no solo para reaccionar de manera efectiva a las condiciones cambiantes del campo, sino para anticiparse a los problemas y gestionar proactivamente la variabilidad intrínseca de los sistemas agrícolas, lo que conduce a una agricultura intrínsecamente más eficiente, rentable y resiliente en el largo plazo.

Síntesis final

El Capítulo 10 consolida la transición de la agricultura de precisión hacia una agricultura inteligente basada en datos, donde la toma de

decisiones deja de depender exclusivamente de la experiencia empírica y se fundamenta en sistemas tecnológicos integrados que capturan, procesan y transforman información en conocimiento estratégico.

La incorporación del Internet de las Cosas (IoT) en el sector agropecuario representa un cambio estructural en la forma de entender el sistema suelo–planta–atmósfera. A través de sensores remotos y proximales, es posible monitorear en tiempo real variables críticas como humedad del suelo, CE, temperatura, índices espectrales (NDVI), radiación solar y dinámica climática. Esta información, transmitida mediante redes LPWAN como LoRa o NB-IoT, permite superar las limitaciones históricas de conectividad en zonas rurales, garantizando eficiencia energética y cobertura amplia.

Sin embargo, la verdadera revolución no radica únicamente en la captura de datos, sino en su capacidad de integración y análisis masivo. El Big data agrícola transforma millones de registros en patrones predictivos que permiten anticipar eventos productivos, climáticos o fitosanitarios. Mediante algoritmos de Machine Learning, los sistemas agrícolas pueden identificar correlaciones complejas entre variables edáficas, fisiológicas y ambientales, facilitando:

- Predicción de estrés hídrico antes de que sea visible.
- Detección temprana de enfermedades.
- Estimación de rendimiento con alta precisión.
- Optimización del uso de agua, fertilizantes y agro insumos.

Este enfoque evoluciona hacia una agricultura prescriptiva, donde el sistema no solo diagnostica, sino que recomienda acciones específicas adaptadas a la variabilidad espacial del terreno.

La integración con plataformas SIG permite comprender el territorio desde una dimensión espacial, visualizando zonas de riesgo, heterogeneidad

de suelos y dinámicas micro climáticas. Al combinar análisis geoespacial con datos en tiempo real, el productor puede implementar estrategias diferenciadas que aumentan eficiencia y reducen impactos ambientales.

Asimismo, el uso de Edge Computing introduce una capa de autonomía operativa, permitiendo que decisiones críticas como la activación de riego o la regulación de fertilización se ejecuten localmente sin depender de conexión constante a la nube. Complementariamente, la Nube agrícola (Cloud Farming) garantiza almacenamiento escalable, análisis histórico y acceso remoto a información estratégica, fortaleciendo la trazabilidad y la gestión empresarial.

Un aspecto fundamental desarrollado en este capítulo es la interoperabilidad de datos, condición indispensable para que sensores, plataformas, maquinaria y sistemas analíticos trabajen de forma integrada. Sin estándares y compatibilidad tecnológica, la digitalización pierde eficiencia y se fragmenta.

Desde una perspectiva productiva y ambiental, la digitalización agrícola aporta:

- Reducción significativa en consumo de agua.
- Disminución de aplicaciones innecesarias de agroquímicos.
- Aumento del rendimiento por manejo diferencial.
- Mejora en resiliencia frente al cambio climático.
- Optimización de costos operativos.

En sistemas agroforestales tropicales, como los de cacao en zonas húmedas, estas herramientas permiten modelar riesgos fitosanitarios, identificar zonas con mayor acumulación de humedad, correlacionar carbono orgánico con productividad y diseñar estrategias de manejo basadas en evidencia científica.

En términos formativos, este capítulo redefine el perfil del profesional agropecuario que busca no solo interpreta análisis de suelo o fenología del cultivo; también comprende arquitecturas IoT, flujos de datos, modelos predictivos y análisis geoespacial. La convergencia entre ciencias agrarias, ingeniería de datos y tecnologías digitales constituye el núcleo de la agricultura moderna.

Finalmente, el Capítulo 10 demuestra que la agricultura digital no es una tendencia pasajera, sino una evolución estructural hacia sistemas productivos más eficientes, sostenibles, resilientes y competitivos. La integración tecnológica permite avanzar desde una agricultura basada en insumos hacia una agricultura basada en conocimiento. La agricultura del futuro no se limita a producir más; produce mejor, con menor impacto y mayor precisión.

Ejercicios prácticos y de discusión

a. Diseñe la arquitectura IoT para una finca agroforestal de 10 ha en ladera.

b. ¿Qué sensores priorizaría si el problema principal es estrés hídrico?

c. ¿Cómo integraría datos de carbono orgánico con NDVI?

d. Proponga un modelo predictivo para incidencia de moniliasis en cacao.

e. Analice las ventajas económicas del uso de Big data frente al manejo tradicional.

Ejercicio 1: Diseño de un plan de calibración de cosechadora y verificación de datos

Objetivo: Comprender la importancia de la calibración y la verificación de datos en la generación de mapas de rendimiento precisos.

Situación: Imagina que eres un ingeniero agrónomo recién egresado y tu primer trabajo es en una finca productora de papa de Nariño. La finca acaba de adquirir una cosechadora de papa equipada con un monitor de rendimiento de última generación. El propietario está emocionado con la idea de tener mapas de rendimiento, pero no tiene experiencia en la calibración del equipo.

Preguntas prácticas y de discusión:

1. Diseño de la calibración: Describe paso a paso cómo planificarías y ejecutarías la calibración inicial del monitor de rendimiento de la cosechadora de papa. ¿Qué variables clave necesitarías medir manualmente y con qué frecuencia lo harías durante la cosecha?

2. Identificación de errores: ¿Qué tipos de errores en la recolección de datos podrías esperar si la cosechadora no está bien calibrada? ¿Cómo se manifestarían estos errores en un mapa de rendimiento final?

3. Verificación Post-calibración: Una vez finalizada la calibración inicial, ¿cómo asegurarías que el monitor de rendimiento sigue siendo preciso durante toda la campaña de cosecha? Propón un método de verificación periódica.

4. Desafíos en Nariño: Considerando la topografía de Nariño (pendientes, terrenos irregulares) y las condiciones climáticas (lluvias frecuentes), ¿qué desafíos adicionales podrías enfrentar al calibrar y operar la cosechadora con monitor de rendimiento? ¿Cómo los abordarías?

Ejercicio 2: Interpretación y correlación de mapas para toma de decisiones

Objetivo: Desarrollar habilidades de interpretación y análisis de datos geoespaciales para identificar factores limitantes del rendimiento.

Situación: Tienes acceso a los siguientes mapas para un lote de cultivo de cebada en un área representativa: * Mapa de Rendimiento de Cebada (del ciclo anterior). * Mapa de pH del suelo (valores entre 4.5 y 6.0). * Mapa de Contenido de Materia Orgánica (valores entre 3% y 7%). * Mapa Topográfico (con zonas de baja elevación y alta pendiente). * Imágenes NDVI (de la etapa de macollamiento del ciclo anterior).

Preguntas prácticas y de discusión:

1. Análisis visual: Describe cómo superpondrías y analizarías visualmente estos mapas. ¿Qué posibles correlaciones entre el rendimiento y los otros atributos esperarías encontrar? (Por ejemplo, ¿cómo influye el pH bajo en el rendimiento de cebada en Nariño?)

2. Hipótesis de problemas: Basado en las correlaciones hipotéticas, formula al menos tres hipótesis sobre los posibles factores que limitan el rendimiento en las zonas de baja productividad.

3. Diseño de muestreo de verificación: Si tuvieras que enviar un equipo de campo a verificar estas hipótesis, ¿dónde y qué tipo de muestras o mediciones manuales recolectarías en el campo para confirmar tus hallazgos? Sé específico en los puntos y el tipo de dato.

4. Recomendación de manejo: Suponiendo que tus hipótesis se confirman, ¿qué ajustes específicos recomendarías para el próximo ciclo agrícola con el fin de mejorar el rendimiento en las zonas problemáticas?

Ejercicio 3: Planificación de parcelas de calibración para validación de dosis variables

Objetivo: Comprender la metodología de diseño y la importancia de las parcelas de calibración para validar tecnologías de aplicación variable.

Situación: Una cooperativa de agricultores de Boyacá está considerando implementar la fertilización nitrogenada variable en sus cultivos de papa. Necesitan validar si la aplicación de dosis diferenciadas de nitrógeno, basadas en mapas de demanda generados a partir de sensores de cultivo, realmente genera un beneficio económico y ambiental.

Preguntas prácticas y de discusión:

1. Diseño experimental: Describe cómo diseñarías un experimento utilizando parcelas de calibración para validar la eficacia de la fertilización nitrogenada variable. ¿Cuántas parcelas de prueba necesitarías? ¿Qué tratamientos (dosis de nitrógeno) aplicarías? ¿Cómo asegurarías la representatividad y la aleatorización?

2. Variables a medir: ¿Qué variables de rendimiento y agronómicas específicas medirías manualmente en estas parcelas de calibración para evaluar la respuesta del cultivo? ¿Con qué frecuencia y en qué momentos del ciclo del cultivo?

3. Análisis de resultados: ¿Cómo analizarías los datos recopilados para determinar si la aplicación variable fue efectiva? ¿Qué indicadores económicos y ambientales usarías para presentar tus resultados a la cooperativa?

4. Limitaciones: ¿Qué posibles limitaciones o fuentes de variabilidad podrían afectar los resultados de tu experimento en las condiciones de Nariño (clima, tipos de suelo heterogéneos, manejo del agricultor)?

Ejercicio 4: Toma de decisiones y ajustes basados en múltiples ciclos agrícolas

Objetivo: Entender cómo los datos históricos y el análisis multianual informan los ajustes para futuras campañas.

Situación: Llevas tres años monitoreando un mismo lote de cultivo de maíz en el valle del Patía, Nariño, y tienes mapas de rendimiento, análisis de suelo anuales, y registros detallados de todas las aplicaciones de insumos (semilla, fertilizantes, agua) para cada ciclo. Has notado una zona persistente de bajo rendimiento en una esquina del lote.

Preguntas prácticas y de discusión:

1. Análisis histórico: ¿Qué tipo de análisis realizarías con los datos de los tres años para comprender las causas de la zona de bajo rendimiento persistente? ¿Qué correlaciones buscarías entre los mapas de rendimiento históricos y otros datos?

2. Hipótesis de problemas crónicos: Basado en la persistencia del problema, formula al menos dos hipótesis sobre la causa subyacente que no pudo ser resuelta con ajustes anuales menores (ej., una deficiencia estructural, un problema de suelo severo).

3. Propuesta de solución a largo plazo: ¿Qué tipo de ajuste "estructural" o a largo plazo recomendarías para el próximo ciclo agrícola y los subsiguientes para abordar este problema crónico? (Piensa más allá de la fertilización anual, por ejemplo, enmiendas, drenaje, cambio de cultivo).

4. Monitoreo del impacto: ¿Cómo monitorearías y evaluarías la efectividad de esta solución a largo plazo en los próximos ciclos agrícolas? ¿Qué indicadores te dirían si la inversión está dando frutos?

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

Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., & Schulthess, U. (2013). Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. *Precision Agriculture,* 14(2), 168–181. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9289-6

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

Doerge, T. (2002). Variable rate nitrogen management. *Crop Insights,* 12(1), 1–7.

Evett, S. R., Colaizzi, P. D., O'Shaughnessy, S. A., & Howell, T. A. (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

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. (2014). *Precision farming tools: Variable-rate application.* Virginia Cooperative Extension Publication.

Hunt, E. R., Hively, W. D., Daughtry, C. S. T., McCarty, G. W., & Fujikawa, S. J. (2013). Remote sensing of crop leaf area index using unmanned aerial vehicles. *Precision Agriculture,* 14(2), 161–178. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9294-9

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

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

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

Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., & Friedman, S. P. (2008). 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/vzj2003.0444

Scharf, P. C., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., & Davis, J. G. (2002). Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate. *Soil Science Society of America Journal,* 66(6), 2154–2160. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.2154

Searcy, S. W., Schueller, J. K., & Bae, Y. H. (2017). Mapping of spatially variable yield during grain combining. *Transactions of the ASABE,* 32(3), 826–829. https://doi.org/10.13031/2013.31086

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

Zhang, Y., Kendy, E., Qiang, Y., Liu, C., Shen, Y., & Sun, H. (2012). Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management,* 64(2), 107–122.

Capítulo 3

Integración de Inteligencia artificial y Big data



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

1. Comprender el papel estratégico de la Inteligencia artificial (IA) en la agricultura moderna.

2. Diferenciar entre Machine Learning, Deep Learning y modelos predictivos aplicados al agro.

3. Integrar datos climáticos, edáficos, fisiológicos y productivos en modelos de decisión.

4. Analizar la automatización agrícola basada en visión computacional y robótica.

5. Diseñar esquemas básicos de toma de decisiones predictivas en sistemas agrícola y agroforestales.

6. Evaluar impactos económicos, ambientales y productivos de la IA en sistemas agrícolas tropicales.

Conceptos clave

- Inteligencia artificial (IA): La Inteligencia artificial es el conjunto de métodos computacionales que permiten a un sistema simular procesos cognitivos humanos como aprendizaje, reconocimiento de patrones, razonamiento y toma de decisiones. En agricultura, la IA integra grandes volúmenes de datos agroclimáticos, edáficos, fisiológicos y productivos para generar predicciones, recomendaciones y acciones automatizadas que optimizan la gestión del sistema productivo.

- Machine Learning supervisado y no supervisado: El Machine Learning (aprendizaje automático) es una rama de la IA que permite

a los sistemas aprender patrones a partir de datos históricos sin programación explícita de reglas.

  - Supervisado: Utiliza datos etiquetados (ejemplo: rendimiento conocido por parcela) para entrenar modelos que predicen resultados futuros. Se aplica en predicción de producción, clasificación de enfermedades y estimación de estrés hídrico.

  - No supervisado: Identifica patrones ocultos sin etiquetas previas. Se utiliza en zonificación agroecológica, segmentación de suelos o identificación de grupos productivos homogéneos.

- Deep Learning: El Deep Learning es una subcategoría del Machine Learning basada en redes neuronales profundas con múltiples capas ocultas que permiten modelar relaciones altamente complejas y no lineales. En agricultura, se utiliza principalmente en análisis de imágenes (detección de enfermedades, conteo de frutos, clasificación de malezas) y en modelación avanzada de series temporales climáticas.

- Modelos predictivos agroclimáticos: Son modelos matemáticos y computacionales que integran variables climáticas (temperatura, precipitación, radiación, humedad relativa, viento) con variables fisiológicas y edáficas para estimar el comportamiento futuro del cultivo. Permiten anticipar rendimiento, riesgo de enfermedades, requerimientos hídricos y respuesta a eventos climáticos extremos.

- Redes neuronales artificiales (RNA): Son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano, compuestos por nodos interconectados (neuronas artificiales) organizados en capas. Cada conexión tiene un peso ajustable durante el entrenamiento. En agricultura, las RNA permiten modelar interacciones complejas entre variables como carbono orgánico, fertilización, microclima y rendimiento.

- Visión computacional: Es el conjunto de técnicas que permiten a una máquina interpretar y analizar imágenes digitales. En el agro, se utiliza para identificar enfermedades foliares, detectar malezas en tiempo real, estimar biomasa, evaluar vigor vegetativo y monitorear estado fisiológico mediante imágenes RGB o multiespectrales.

- Agricultura autónoma: Es un sistema de producción agrícola donde la toma de decisiones y ejecución de tareas (riego, fertilización, control fitosanitario, cosecha) se realizan automáticamente mediante sensores, algoritmos y actuadores, con mínima intervención humana directa. Se basa en integración de IA, robótica y conectividad IoT.

- Robótica agrícola: Es la aplicación de sistemas mecánicos automatizados y programables en actividades agrícolas. Incluye robots de siembra, deshierbe, cosecha, pulverización selectiva y monitoreo. Su funcionamiento puede estar guiado por sistemas GPS de alta precisión y algoritmos de visión computacional.

- Gemelos digitales (Digital Twin): Un gemelo digital es una representación virtual dinámica de un sistema productivo real que integra datos en tiempo real para simular escenarios, evaluar respuestas del cultivo y optimizar decisiones antes de aplicarlas en campo. Permite modelar productividad, consumo hídrico, dinámica del carbono y rentabilidad bajo diferentes escenarios climáticos.

- Sistemas de soporte a decisiones (DSS): Son plataformas computacionales que integran bases de datos, modelos analíticos y herramientas de visualización para apoyar la toma de decisiones agronómicas. En agricultura avanzada, los DSS combinan modelos predictivos, mapas prescriptivos y alertas automatizadas para mejorar eficiencia técnica y económica.

- Automatización adaptativa: Es la capacidad de un sistema agrícola automatizado para modificar su comportamiento en función de cambios en las condiciones ambientales o productivas. Por ejemplo, ajustar la dosis de riego en tiempo real según humedad del suelo o modificar fertilización según análisis espectral del cultivo.

- Agricultura prescriptiva: Es el nivel más avanzado de la agricultura de precisión, donde el sistema no solo monitorea y analiza datos, sino que genera recomendaciones específicas y ejecutables para cada unidad espacial del cultivo. Se basa en modelos predictivos y algoritmos de optimización que determinan qué hacer, dónde hacerlo, cuándo hacerlo y en qué cantidad hacerlo.

Desarrollo técnico

Integración de inteligencia artificial y big data

La agricultura, concebida como un pilar fundamental e irremplazable de la civilización humana a lo largo de su historia, se encuentra actualmente en la cúspide de una transformación paradigmática sin precedentes. Esta metamorfosis está siendo impulsada de manera decisiva por la convergencia sinérgica de dos tecnologías de vanguardia: la Inteligencia artificial (IA) y el Big data. Tradicionalmente, las decisiones agronómicas y las estrategias de manejo en el sector primario se han cimentado predominantemente en la experiencia empírica acumulada por generaciones, la observación manual directa y el análisis de datos agregados a gran escala, a menudo con una granularidad limitada. Sin embargo, los desafíos contemporáneos, entre los que se destacan el crecimiento demográfico global, la creciente escasez de recursos hídricos, los efectos cada vez más evidentes del cambio climático y la necesidad de transitar hacia modelos de producción sostenibles, exigen un paradigma agrícola más preciso, eficientemente optimizado y altamente adaptable (Tilman et al., 2002). En este contexto, la agricultura de precisión emerge como una respuesta estratégica y tecnológicamente avanzada, al abandonar las prácticas uniformes en favor de una gestión localizada

y diferenciada, orientada a optimizar el uso de insumos y maximizar la productividad del suelo y de los cultivos.

Este nuevo enfoque ha sido posible gracias a la capacidad tecnológica de recopilar, almacenar y procesar volúmenes masivos de información, fenómeno conocido como Big data, provenientes de múltiples fuentes heterogéneas. Entre estas se incluyen redes de sensores instalados en campo, sistemas de teledetección basados en imágenes satelitales y vehículos aéreos no tripulados (drones), maquinaria agrícola equipada con sistemas de posicionamiento y conectividad, así como pronósticos meteorológicos de alta resolución. Esta integración de datos ha permitido a los productores y técnicos contar con un nivel de detalle sin precedentes sobre la variabilidad espacial y temporal de los sistemas productivos. No obstante, es fundamental reconocer que la acumulación de grandes volúmenes de datos, por sí sola, no genera valor. El verdadero potencial del Big data radica en su capacidad de ser transformado, mediante herramientas analíticas avanzadas, en conocimiento útil y accionable para la toma de decisiones agronómicas.

Es en este punto donde la Inteligencia artificial adquiere un rol protagónico y estratégico. A través del uso de algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) y Deep Learning (deep learning), la IA permite analizar grandes conjuntos de datos de manera simultánea, identificar patrones complejos que no son evidentes mediante métodos convencionales, detectar anomalías críticas, predecir escenarios futuros con altos niveles de precisión y, en muchos casos, automatizar procesos de decisión en tiempo real (Benos et al., 2021). Esta capacidad analítica transforma radicalmente la forma en que se interpretan los datos agrícolas, pasando de un enfoque descriptivo a uno predictivo y prescriptivo, con impactos directos sobre la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental.

En este marco, el presente capítulo, titulado “Integración de Inteligencia artificial y Big data aplicados en la Agricultura de precisión”, tiene como propósito analizar de manera sistemática y rigurosa cómo la interacción entre estas dos tecnologías está impulsando una profunda transformación

en la agricultura moderna. A lo largo de sus secciones se abordan los procesos de recopilación y gestión de datos, así como las principales aplicaciones de la Inteligencia artificial en la optimización de procesos clave, tales como la zonificación productiva, el diseño de sistemas de riego inteligente, la detección temprana de enfermedades, y la gestión integrada y localizada de plagas. Asimismo, se discuten los beneficios económicos y ambientales derivados de esta integración tecnológica, resaltando su potencial para mejorar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas y reducir la huella ecológica de la producción de alimentos. Finalmente, se analizan de manera crítica los principales desafíos y limitaciones que aún dificultan su adopción a gran escala, junto con las perspectivas futuras que proyectan una agricultura más inteligente, sostenible y resiliente frente a los retos globales. El objetivo final es ofrecer al lector una comprensión sólida y fundamentada de cómo estas herramientas están redefiniendo el presente y el futuro de la producción agrícola.

1. Definiciónes: Inteligencia artificial (IA) y Big data

Para comprender a cabalidad la profunda y multifacética transformación que las tecnologías digitales están catalizando en diversos sectores productivos, incluida de manera destacada la agricultura, resulta imprescindible establecer definiciones claras, conceptualmente sólidas y técnicamente precisas de la Inteligencia artificial (IA) y del Big data. Estos conceptos constituyen la base teórica sobre la cual se sustenta el desarrollo de la agricultura de precisión y de los sistemas de toma de decisiones basados en datos.

1.1 Inteligencia artificial (IA)

La Inteligencia artificial (IA) se define como un campo interdisciplinario y en constante evolución de las ciencias de la computación cuyo objetivo central es el diseño y desarrollo de sistemas computacionales capaces de ejecutar tareas que, por su naturaleza, han requerido tradicionalmente habilidades cognitivas propias de la inteligencia humana. Estas habilidades

incluyen la percepción del entorno, la interpretación de información compleja, el razonamiento lógico, el aprendizaje a partir de la experiencia, la toma de decisiones y la resolución autónoma de problemas (Russell & Norvig, 2010). A diferencia de los sistemas automatizados tradicionales, que operan bajo reglas fijas y predefinidas, la IA se caracteriza por su capacidad de adaptación y mejora continua frente a escenarios dinámicos y cambiantes.

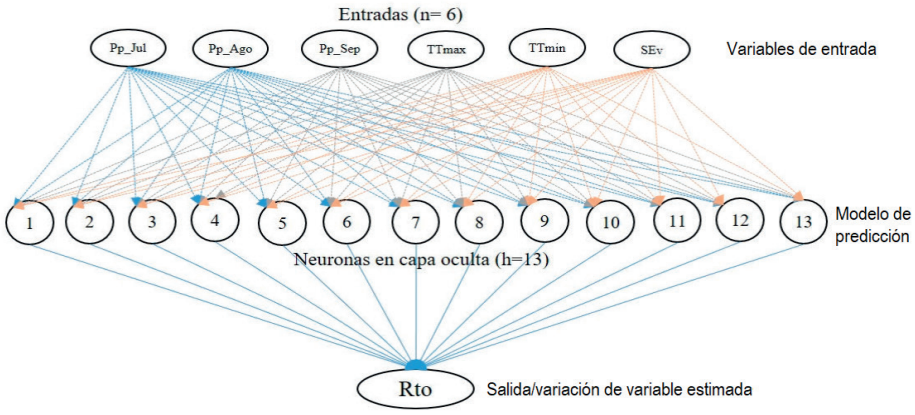
En este sentido, la IA no se limita a la simple automatización de procesos repetitivos, sino que busca emular y ampliar funciones cognitivas mediante el desarrollo de algoritmos avanzados y modelos matemáticos capaces de aprender tanto en entornos supervisados como no supervisados. Esta característica resulta especialmente relevante en contextos agrícolas, donde la variabilidad ambiental, edáfica y climática exige sistemas flexibles y altamente adaptativos.

Dentro del amplio espectro de la Inteligencia artificial, existen diversas subdisciplinas y enfoques metodológicos. Entre ellas, el Aprendizaje Automático (Machine Learning, ML) y el Deep Learning (Deep Learning, DL) destacan como las más influyentes en la actualidad, debido a su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos heterogéneos y extraer patrones complejos de alto valor predictivo:

- Aprendizaje Automático (Machine Learning – ML): El aprendizaje automático constituye una rama fundamental de la IA que permite a los sistemas computacionales aprender directamente de los datos sin necesidad de ser programados explícitamente para cada tarea o condición específica. En este enfoque, los algoritmos construyen modelos predictivos o de clasificación a partir de un conjunto de datos de entrenamiento, los cuales son posteriormente utilizados para realizar inferencias, predicciones o decisiones sobre nuevos datos no observados (Mitchell, 1997). Su funcionamiento se basa en la identificación de relaciones estadísticas subyacentes y patrones recurrentes, lo que permite que el sistema mejore progresivamente su desempeño a medida que incorpora nueva información.

- Deep Learning (Deep Learning): El Deep Learning representa un subcampo avanzado del aprendizaje automático, inspirado en la estructura y el funcionamiento del cerebro humano. Este enfoque utiliza redes neuronales artificiales con múltiples capas ocultas, lo que les permite aprender representaciones jerárquicas y abstractas de los datos. El Deep Learning ha demostrado una alta eficacia en el procesamiento de datos no estructurados, como imágenes, audio y texto, y ha impulsado avances significativos en áreas como la visión por computadora, el reconocimiento de voz y el procesamiento del lenguaje natural (Goodfellow et al., 2016). Gracias a su arquitectura profunda, estos modelos pueden captar patrones complejos a diferentes niveles de abstracción, lo cual resulta especialmente útil en aplicaciones agrícolas como el análisis de imágenes multiespectrales, la detección temprana de enfermedades y la predicción del rendimiento de cultivos (ver Figura 1).

Figura 1. *Deep Learning – DL, Red Neuronal Profunda*



Fuente: Modificado de SmartPanel (2018)

En esencia, la Inteligencia artificial tiene como propósito emular, replicar y, en muchos casos, ampliar las capacidades cognitivas propias de

la inteligencia humana dentro del ámbito de los sistemas computacionales, permitiendo que las máquinas no se limiten a ejecutar instrucciones predefinidas, sino que sean capaces de comprender el contexto, interpretar información compleja y aprender de manera continua a partir del vasto universo de datos que las rodea.

1.2 Big data

El concepto de Big data hace referencia a conjuntos de datos cuya escala, complejidad y dinámica de generación superan ampliamente la capacidad de los métodos y herramientas tradicionales de procesamiento y análisis, volviéndolos insuficientes para su gestión eficiente y para la extracción de información de valor estratégico (Davenport, 2014). En este sentido, el Big data no se define únicamente por el volumen absoluto de los datos, sino por un conjunto de características interrelacionadas que describen su comportamiento, naturaleza y potencial de uso. Estas características han sido sintetizadas en el paradigma de las denominadas "Vs" del Big data, inicialmente tres y posteriormente ampliadas para ofrecer una descripción más integral del fenómeno (Ver tabla 1):

Tabla 1. *Dimensiones estratégicas del Big data y su aplicación en Agricultura de precisión*

Dimensión (V)	Definición técnica	Características clave	Ejemplos en agricultura	Implicación estratégica
Volumen	Gran cantidad de datos generados y almacenados continuamente, superando la capacidad de herramientas tradicionales.	Escalas de terabytes, petabytes o más; almacenamiento masivo y persistente.	Imágenes de drones de alta resolución, series temporales de sensores de suelo y clima, registros históricos de manejo.	Requiere infraestructura de almacenamiento y procesamiento distribuido.
Velocidad	Rapidez con la que los datos son generados, transmitidos y procesados.	Flujo continuo de datos; necesidad de análisis en tiempo real o casi real.	Monitoreo fisiológico en tiempo real, detección temprana de estrés hídrico, respuesta ante eventos climáticos extremos.	Permite toma de decisiones oportuna y manejo adaptativo.
Variedad	Diversidad de tipos, fuentes y formatos de datos.	Datos estructurados, semiestructurados y no estructurados.	Datos numéricos de sensores, imágenes satelitales multiespectrales, videos de drones, registros de maquinaria.	Exige integración y normalización de múltiples fuentes.

Dimensión (V)	Definición técnica	Características clave	Ejemplos en agricultura	Implicación estratégica
Veracidad	Calidad, precisión y confiabilidad de los datos.	Necesidad de depuración, validación y control de errores.	Corrección de datos erróneos de sensores, filtrado de ruido en imágenes, validación cruzada de registros.	Garantiza decisiones técnicamente válidas y científicamente sólidas.
Valor	Capacidad de transformar datos en conocimiento útil y accionable.	Extracción de patrones, tendencias y relaciones estratégicas.	Optimización de fertilización variable, reducción de costos, mejora de productividad y sostenibilidad.	Justifica la inversión tecnológica y genera ventajas competitivas.

Fuente: Modificado de Sagiroglu & Sinanc, (2013); IBM, (2013); Mayer-Schönberger & Cukier, (2013) & Davenport, (2014).

En síntesis, el Big data representa la capacidad tecnológica de gestionar, procesar y analizar conjuntos de datos caracterizados por su gran volumen, alta velocidad de generación y diversidad de formatos, los cuales exceden las capacidades de las metodologías convencionales. Esta infraestructura de datos constituye la base fundamental sobre la cual la Inteligencia artificial puede operar de manera efectiva, permitiéndole identificar patrones complejos, modelar relaciones no evidentes y generar conocimiento que sería inaccesible para el análisis humano o para sistemas tradicionales. De esta forma, Big data e Inteligencia artificial se consolidan como tecnologías complementarias e interdependientes en el desarrollo de la agricultura de precisión (Ver figura 2).

Figura 2. *Uso de datos agrícolas + IA + Big data*



Fuente: Generada de IA en esta investigación

3. Mecanismos de recopilación y gestión de datos

La agricultura de precisión, en su concepción más fundamental, se sustenta de manera intrínseca en la disponibilidad de datos de alta calidad y, de forma igualmente crítica, en la capacidad de transformar dichos datos brutos en información útil, relevante y accionable para la toma de decisiones agronómicas óptimas. Este proceso integral da inicio con la recopilación sistemática de datos provenientes de una multiplicidad de fuentes heterogéneas y se complementa indispensablemente con una gestión eficiente de la información, que asegura su almacenamiento seguro, su organización lógica y su accesibilidad oportuna. La robustez y la eficacia de estos mecanismos de recopilación y gestión son elementos cruciales que determinan la funcionalidad y el éxito de cualquier sistema de agricultura inteligente.

4. Mecanismos de recopilación de datos

La agricultura de precisión, en su concepción más esencial, se fundamenta en la disponibilidad de datos de alta calidad y, de manera igualmente crítica, en la capacidad de transformar dichos datos brutos en información útil, relevante y verdaderamente accionable para la toma de decisiones agronómicas. Este proceso integral comienza con la recopilación sistemática de información proveniente de múltiples fuentes heterogéneas y continúa con una gestión eficiente de los datos, orientada a garantizar su almacenamiento seguro, su adecuada organización y su disponibilidad oportuna para el análisis.

La solidez de los sistemas de agricultura inteligente depende, en gran medida, de la confiabilidad de los mecanismos empleados para capturar la información y de la eficiencia con la que esta es gestionada a lo largo de todo su ciclo de vida. Una recopilación deficiente o una gestión inadecuada de los datos puede conducir a interpretaciones erróneas y decisiones subóptimas, mientras que un sistema robusto de manejo de información permite integrar diversas fuentes de datos, reducir la incertidumbre y mejorar la precisión

de las recomendaciones agronómicas. En este sentido, los mecanismos de recopilación y gestión de datos constituyen un pilar estructural que condiciona directamente el funcionamiento, la escalabilidad y el éxito de la agricultura de precisión.

4.1 Sensores remotos

Los sensores remotos constituyen herramientas esenciales y no invasivas que permiten la adquisición de datos desde una distancia considerable, sin requerir contacto físico directo con el objeto de estudio. Estos se clasifican principalmente en dos categorías dominantes en la agricultura de precisión en sensores satelitales y drones (UAVs - Unmanned Aerial Vehicles) anteriormente ya mencionados.

4.2 Sensores en campo (In Situ)

Estos dispositivos se instalan directamente en el medio edáfico, sobre la estructura de las plantas o en el entorno inmediato del cultivo, con el fin de medir de manera continua y, en muchos casos, en tiempo real, parámetros específicos de alto interés agronómico. La información generada por estos sensores se caracteriza por su alta fidelidad y precisión, lo que los convierte en herramientas fundamentales para la toma de decisiones en agricultura de precisión:

- Sensores de suelo: Los sensores de suelo permiten el monitoreo de variables pedológicas críticas, tales como el contenido de humedad (medido mediante tecnologías capacitivas, tensiómetros u otros principios físicos), la temperatura del perfil, el pH, la CEa y la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio. Estos datos son de importancia estratégica para el diseño y la optimización de los planes de riego y fertilización, ya que posibilitan una aplicación precisa y localizada de los insumos, ajustada a las necesidades reales del cultivo en cada momento y en cada zona del lote (Liu et al., 2020).

- Sensores de plantas: Este grupo incluye una amplia variedad de instrumentos diseñados para evaluar de manera directa el estado fisiológico del cultivo. Entre ellos se encuentran los medidores de clorofila, que proporcionan información sobre el estado nutricional, particularmente del nitrógeno; los termómetros de superficie foliar, utilizados para detectar estrés hídrico a partir de variaciones en la temperatura asociadas a la transpiración; los dendrómetros, que permiten cuantificar el crecimiento del tallo o tronco; y los sensores de flujo de savia, empleados para estimar el transporte de agua dentro de la planta. En conjunto, estos dispositivos ofrecen información en tiempo real sobre el nivel de estrés abiótico, la actividad fisiológica y la eficiencia fotosintética, permitiendo la detección temprana de problemas incluso antes de que se manifiesten síntomas visibles a simple vista (Rose et al., 2021).

- Estaciones meteorológicas locales:Las estaciones meteorológicas instaladas a escala predial o regional recopilan datos climáticos de alta resolución espacial y temporal, incluyendo temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación solar incidente y precipitación. Esta información resulta fundamental para la planificación de labores agrícolas, la modelación de procesos ecofisiológicos, la predicción del desarrollo y la propagación de plagas y enfermedades, así como para la estimación precisa de la evapotranspiración real del cultivo y la programación eficiente del riego (Sishodia et al., 2020).

4.3 Maquinaria agrícola conectada

La maquinaria agrícola de última generación se caracteriza por integrar sistemas electrónicos, sensores y plataformas de comunicación que no solo permiten la ejecución eficiente de las labores de campo, sino que además generan, registran y transmiten grandes volúmenes de datos operacionales y agronómicos en tiempo real. Esta maquinaria conectada constituye un componente clave de la agricultura de precisión, ya que

actúa simultáneamente como herramienta de intervención y como fuente continua de información georreferenciada, esencial para el análisis de la variabilidad espacial y la optimización del manejo agrícola.

- GPS y sistemas de posicionamiento global diferencial (DGPS): Los sistemas de posicionamiento global, especialmente aquellos basados en correcciones diferenciales (DGPS), permiten alcanzar niveles de precisión espacial centimétrica e incluso milimétrica en las operaciones agrícolas. Estas tecnologías hacen posible el mapeo preciso del rendimiento, la guía automática y semiautomática de tractores, y la aplicación variable de insumos con alta exactitud. La información de posicionamiento garantiza que todas las mediciones y aplicaciones realizadas en campo estén correctamente georreferenciadas, lo que resulta fundamental para la generación de mapas digitales confiables y para la repetibilidad de las labores agrícolas a lo largo del tiempo (Liu et al., 2021).

- Sensores de rendimiento: Los sensores de rendimiento, integrados principalmente en cosechadoras, miden de forma continua la cantidad de grano o biomasa cosechada en cada punto del campo, asociando esta información con coordenadas geográficas precisas. El resultado es la generación de mapas de rendimiento detallados que reflejan la variabilidad espacial de la productividad dentro de una misma parcela. Estos mapas constituyen una herramienta clave para identificar zonas de alto y bajo rendimiento, analizar las causas subyacentes de dicha variabilidad y orientar decisiones futuras relacionadas con fertilización, riego, selección de cultivos o zonificación productiva (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

- Sensores de aplicación variable: Presentes en equipos como pulverizadoras, sembradoras y sistemas de fertilización, los sensores de aplicación variable permiten monitorear y regular en tiempo real la dosis de insumos aplicados, tales como fertilizantes, semillas y productos fitosanitarios. Estos dispositivos aseguran que los

insumos se distribuyan de manera precisa y localizada, siguiendo las prescripciones establecidas en mapas digitales previamente elaborados a partir del análisis integrado de datos de suelo, cultivo y clima. De esta forma, se optimiza el uso de recursos, se reducen costos operativos y se minimizan los impactos ambientales asociados a la sobre aplicación de insumos.

4.4 Mecanismos de gestión de datos

La recopilación de grandes volúmenes de datos, por sí sola, carecería de utilidad si no estuviera acompañada de una infraestructura tecnológica adecuada y de metodologías rigurosas para su gestión eficiente y su transformación en información significativa. En el contexto de la agricultura de precisión, la gestión de datos comprende un conjunto de procesos interconectados que abarcan el almacenamiento seguro, la integración coherente de múltiples fuentes, el procesamiento computacional y la preparación de los datos para su posterior análisis y modelado mediante herramientas avanzadas, incluida la Inteligencia artificial, (Ver tabla 2 y Figura 3).

Tabla 2. *Infraestructura tecnológica para la gestión de Big data en Agricultura de precisión*

Componente tecnológico	Definición técnica	Función principal en AP	Beneficio estratégico	Desafíos asociados
Plataformas en la nube (Cloud Computing)	Infraestructura digital que permite almacenamiento escalable, procesamiento distribuido y acceso remoto a grandes volúmenes de datos.	Gestión masiva de datos geoespaciales, series temporales y modelos analíticos en tiempo real.	Escalabilidad, colaboración remota y análisis avanzado sin infraestructura local costosa.	Dependencia de conectividad, costos de servicio y seguridad de datos.
GIS	Herramientas computacionales para almacenamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados.	Integración y superposición de capas (suelo, rendimiento, NDVI, topografía, zonas de manejo).	Identificación de patrones espaciales y generación de mapas de prescripción para tasa variable.	Requiere capacitación técnica y calidad en datos geoespaciales.
Bases de datos agrícolas específicas	Arquitecturas relacionales y no relacionales diseñadas para integrar datos heterogéneos agrícolas.	Gestión estructurada de información proveniente de sensores, maquinaria y plataformas digitales.	Garantiza consistencia, trazabilidad e interoperabilidad para modelos de IA.	Complejidad de diseño y mantenimiento; integración de múltiples formatos.

Componente tecnológico	Definición técnica	Función principal en AP	Beneficio estratégico	Desafíos asociados
Procesamiento y limpieza de datos (Preprocesamiento)	Conjunto de técnicas para depuración, normalización y validación de datos antes del análisis.	Eliminación de valores atípicos, corrección de errores, interpolación de datos faltantes y estandarización.	Mejora precisión y confiabilidad de modelos predictivos y decisiones agronómicas.	Puede ser intensivo en tiempo y requiere criterios estadísticos adecuados.
Estándares de interoperabilidad (ej. ADAPT)	Protocolos y marcos comunes que facilitan el intercambio de datos entre diferentes sistemas y fabricantes.	Integración fluida de datos a lo largo de la cadena de valor agrícola.	Reduce fragmentación tecnológica y dependencia de proveedores cerrados.	Falta de adopción universal y compatibilidad parcial entre plataformas.

Fuente: Modificado de Wolfert et al.,(2017), Kamilaris et al., (2017); Mandal et al., (2020) & Rose et al., (2021).

Figura 3. *Mecanismos de gestión de datos en le Nube.*



Fuente: Generada de IA en esta investigación

5. Aplicaciones de la IA en la optimización de procesos agrícolas y uso en modelos predictivos para toma de decisiones

En el ecosistema complejo de la agricultura de precisión, la transformación de grandes volúmenes de datos brutos en conocimiento útil y, posteriormente, en decisiones estratégicas accionables constituye el objetivo central y el principal indicador de éxito de los sistemas inteligentes de gestión agrícola. Es precisamente en esta etapa crítica donde los modelos predictivos, impulsados por la integración sinérgica de la Inteligencia artificial (IA) y el Big data, adquieren una relevancia fundamental. Estos modelos avanzados superan las limitaciones del análisis descriptivo

tradicional, orientado únicamente a explicar eventos pasados, y permiten incursionar en un enfoque predictivo y prospectivo, capaz de estimar escenarios futuros con un alto grado de probabilidad.

La capacidad de los modelos predictivos para anticipar el comportamiento de variables clave del sistema productivo como el rendimiento del cultivo, la dinámica hídrica del suelo, la aparición de plagas y enfermedades o la respuesta del cultivo a diferentes estrategias de manejo proporciona a los productores y técnicos una ventaja estratégica significativa. En lugar de adoptar decisiones reactivas frente a problemas ya manifestados, la IA posibilita una gestión proactiva basada en la anticipación de riesgos y oportunidades, permitiendo intervenir de manera temprana y localizada.

Esta capacidad predictiva se traduce en una optimización más eficiente del uso de recursos limitados, tales como agua, fertilizantes, energía y mano de obra, al tiempo que contribuye a la reducción de pérdidas productivas y económicas. Asimismo, el uso de modelos predictivos fortalece la sostenibilidad ambiental de las explotaciones agrícolas, al minimizar la sobre aplicación de insumos y reducir impactos negativos sobre el suelo, el agua y los ecosistemas circundantes. En este contexto, la Inteligencia artificial no solo se consolida como una herramienta tecnológica avanzada, sino como un componente estratégico para la toma de decisiones informadas, resilientes y orientadas a la sostenibilidad en la agricultura moderna.

6. Fundamentos de los modelos predictivos

Los modelos predictivos se construyen a partir de la identificación sistemática de patrones recurrentes y relaciones estadísticas significativas presentes tanto en conjuntos de datos históricos como en información generada en tiempo real. Para ello, emplean algoritmos avanzados de Machine Learning y Deep Learning, los cuales son entrenados para aprender de estos datos y, posteriormente, aplicar el conocimiento adquirido a situaciones o escenarios no observados previamente. La precisión, robustez y capacidad de generalización de estos modelos dependen de manera

directa de la calidad, el volumen y la representatividad de los datos de entrada, así como de la correcta selección del algoritmo y de un proceso de entrenamiento y validación rigurosamente controlado.

Las variables que alimentan los modelos predictivos abarcan un amplio espectro de información relevante para el sistema productivo. Estas pueden incluir variables agronómicas, como el tipo de suelo, la fertilidad y el historial de cultivos; variables climáticas, como la temperatura, la precipitación acumulada y la humedad relativa; atributos geográficos, tales como la altitud, la pendiente y la orientación del terreno; y datos asociados a las prácticas de manejo, entre ellos las fechas de siembra, los calendarios de fertilización y las dosis de insumos aplicados (Liakos et al., 2018). La integración simultánea de estas múltiples fuentes de información permite a la IA capturar la complejidad inherente de los sistemas agrícolas y generar predicciones más precisas y contextualmente relevantes.

Impulsada por la disponibilidad exponencial de Big data, la Inteligencia artificial ha superado la fase meramente experimental para consolidarse como una herramienta de alto impacto en la agricultura de precisión. Su capacidad para analizar patrones complejos, generar predicciones confiables y automatizar procesos ha permitido optimizar de manera significativa diversas operaciones agrícolas, traduciéndose en una mayor eficiencia en el uso de recursos, una mejora en la sostenibilidad ambiental y un incremento en la rentabilidad de las explotaciones. En los apartados siguientes se presentan las aplicaciones más relevantes y de mayor impacto de la IA en la optimización de procesos agrícolas y en el apoyo a la toma de decisiones.

6.1. Zonificación de cultivos y manejo por zonas

Una de las aplicaciones más estratégicas y de mayor impacto de la Inteligencia artificial en la agricultura de precisión es la zonificación de cultivos y el manejo diferenciado por zonas. Tradicionalmente, los sistemas agrícolas han sido gestionados bajo el supuesto de homogeneidad espacial, tratando cada lote como una unidad uniforme y obviando la variabilidad

natural del suelo, del microclima y del rendimiento dentro de una misma parcela. Este enfoque generalizado ha conducido, en muchos casos, a un uso ineficiente de los insumos y a respuestas productivas desiguales.

La Inteligencia artificial permite superar esta limitación mediante la aplicación de algoritmos avanzados de agrupamiento (clustering), como el algoritmo k-means, así como de metodologías de Deep Learning no supervisado, capaces de procesar de manera eficiente grandes volúmenes de datos geoespaciales provenientes de múltiples fuentes heterogéneas. Entre estas fuentes se incluyen mapas históricos de rendimiento, mediciones de CE aparente del suelo, modelos digitales de elevación y topografía, así como imágenes satelitales multiespectrales e hiperespectrales. El objetivo de este análisis integrado es identificar patrones espaciales recurrentes y delimitar zonas de manejo relativamente homogéneas dentro de un mismo campo agrícola (Wolfert et al., 2017).

Cada una de estas zonas de manejo, caracterizada por sus propiedades edáficas, topográficas y productivas específicas, puede ser tratada de manera diferenciada mediante estrategias agronómicas ajustadas a su potencial real. Esto incluye la modificación de la densidad de siembra, la dosificación precisa de fertilizantes y la programación diferenciada del riego, en función de las necesidades particulares de cada zona. Como resultado, se optimiza el uso de los insumos agrícolas, evitando tanto aplicaciones excesivas e innecesarias como deficiencias que limitan el rendimiento, lo que se traduce en una mayor eficiencia productiva, una reducción de costos y una mejora significativa en la sostenibilidad ambiental del sistema agrícola.

6.2. Optimización del riego inteligente

Dada la creciente escasez global de los recursos hídricos y la necesidad imperiosa de promover un uso eficiente y racional del agua en los sistemas productivos, el riego inteligente se consolida como una de las aplicaciones más críticas y de mayor valor estratégico de la Inteligencia artificial en la agricultura de precisión. Estos sistemas avanzados integran de manera

dinámica información en tiempo real proveniente de sensores de humedad del suelo, pronósticos meteorológicos de alta resolución espacial y temporal, imágenes de teledetección que permiten cuantificar el estrés hídrico de las plantas, e incluso modelos predictivos de evapotranspiración (ET), con el fin de estimar con mayor precisión la demanda hídrica del cultivo (Sishodia et al., 2020).

A partir de esta integración de datos, algoritmos avanzados de Machine Learning, como redes neuronales artificiales y máquinas de vectores de soporte, son entrenados para predecir las necesidades hídricas específicas del cultivo en diferentes microzonas del campo y en las distintas etapas fenológicas de su ciclo de desarrollo. Esta aproximación permite capturar la variabilidad espacial y temporal del sistema agrícola, superando los esquemas tradicionales de riego uniforme que no consideran las diferencias intra-parcela.

La capacidad predictiva de estos modelos posibilita que los sistemas de riego automatizados ajusten de forma autónoma tanto la cantidad como el momento óptimo de aplicación del agua, en función de las condiciones reales del suelo, el clima y el estado fisiológico del cultivo. Como resultado, se minimiza el desperdicio del recurso hídrico, se reducen los costos energéticos asociados al bombeo y se previenen escenarios de estrés hídrico por déficit o problemas de encharcamiento por exceso de agua. Esta optimización del riego se traduce directamente en un uso más sostenible del recurso hídrico y en mejoras tangibles tanto en la calidad como en la cantidad de la cosecha final, fortaleciendo la resiliencia y la rentabilidad de los sistemas agrícolas (Liu et al., 2021).

6.3. Detección temprana de enfermedades y plagas

La detección temprana de enfermedades fitosanitarias y la identificación oportuna de plagas constituyen factores críticos para reducir pérdidas significativas en los sistemas productivos agrícolas y para disminuir la dependencia del uso indiscriminado de agroquímicos de

síntesis. En este contexto, la Inteligencia artificial, y en particular el Deep Learning (Deep Learning), ha demostrado una eficacia sobresaliente para el monitoreo fitosanitario de los cultivos. Las redes neuronales convolucionales (CNNs), una subclase de redes neuronales profundas especializada en el análisis de imágenes, son entrenadas utilizando grandes bases de datos que contienen imágenes de plantas afectadas por diversas enfermedades y por la presencia de distintas especies de plagas, permitiéndoles aprender patrones visuales complejos asociados a cada patología o agente biológico (Liu et al., 2021).

El uso de vehículos aéreos no tripulados (drones) equipados con cámaras multiespectrales o hiperespectrales ha potenciado significativamente esta capacidad diagnóstica. Estos sistemas permiten el sobrevuelo sistemático de los campos agrícolas y la captura de imágenes de alta resolución espacial, las cuales, al ser procesadas por modelos de IA, hacen posible la identificación de anomalías sutiles en la reflectancia espectral de las hojas, en la arquitectura del dosel o en la morfología de las plantas. En muchos casos, estas alteraciones fisiológicas y estructurales pueden ser detectadas incluso antes de que los síntomas sean visibles a simple vista, lo que representa una ventaja decisiva para la gestión sanitaria del cultivo (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Esta capacidad de detección ultra-temprana permite implementar estrategias de manejo fitosanitario más precisas y sostenibles, como la aplicación localizada y oportuna de tratamientos, reduciendo la propagación de enfermedades y minimizando el uso generalizado de pesticidas. Además, la integración de modelos predictivos basados en datos climáticos, edáficos y fenológicos del cultivo posibilita anticipar la probabilidad de brotes epidémicos o infestaciones de plagas, fortaleciendo los enfoques preventivos propios del manejo integrado de plagas y enfermedades. En conjunto, estas aplicaciones de la Inteligencia artificial contribuyen a una agricultura más eficiente, económicamente viable y ambientalmente responsable.

6.4. Detección y gestión automatizada de malezas

La gestión de malezas en los sistemas agrícolas ha sido históricamente una labor intensiva en mano de obra y altamente demandante en recursos, mientras que el uso excesivo y no selectivo de herbicidas ha generado impactos ambientales negativos, como la contaminación del suelo y del agua, así como la aparición de resistencias en las poblaciones de malezas. En este contexto, la Inteligencia artificial ofrece soluciones innovadoras y de alto valor tecnológico para la detección precisa y el manejo automatizado de malezas en el marco de la agricultura de precisión.

Mediante el uso de cámaras de alta resolución instaladas en tractores agrícolas, pulverizadoras inteligentes o robots autónomos especializados, los algoritmos de Deep Learning (Deep Learning) pueden analizar imágenes en tiempo real y diferenciar con elevada precisión entre las plantas de cultivo y las malezas indeseadas, incluso en las etapas tempranas del desarrollo fenológico, cuando la identificación visual resulta más compleja (Lottes et al., 2018). Estos modelos son entrenados para reconocer patrones morfológicos, texturales y espectrales específicos, lo que les permite adaptarse a diferentes cultivos y condiciones de campo.

La capacidad discriminatoria de la IA posibilita la implementación de estrategias de aplicación selectiva de herbicidas (spot spraying), limitando el tratamiento únicamente a las áreas infestadas por malezas, o incluso la ejecución de controles mecánicos y físicos mediante robots agrícolas autónomos. Este enfoque reduce de manera drástica la cantidad total de herbicidas utilizados, disminuye los costos operativos asociados al manejo de malezas y contribuye significativamente a la mitigación de los impactos ambientales negativos derivados del uso indiscriminado de agroquímicos (Rose et al., (2021). En conjunto, la integración de la Inteligencia artificial en la gestión de malezas representa un avance clave hacia sistemas agrícolas más eficientes, sostenibles y alineados con los principios de la intensificación sostenible (Ver figura 4).

Figura 4. *Robot – GBOT que quema las malezas con vapor de agua y láser.*



Fuente: Regional Digital (2025)

7. Monitoreo del crecimiento y predicción de rendimiento

El monitoreo continuo del crecimiento del cultivo y la predicción precisa del rendimiento final constituyen componentes fundamentales para una planificación agrícola eficiente y para la optimización de las estrategias de comercialización. En este ámbito, la Inteligencia artificial permite integrar y analizar de manera simultánea múltiples fuentes de información, entre las que se incluyen series temporales de imágenes satelitales o capturadas mediante drones, las cuales aportan índices de vegetación ampliamente utilizados, como el NDVI y el EVI. A esta información se suman datos climáticos históricos y en tiempo real, características edáficas del suelo y registros históricos de rendimiento a escala de parcela, conformando un marco analítico integral del sistema productivo (Pramanik et al., 2019).

A partir de esta integración de datos, los modelos de Machine Learning, como los Random Forests y las máquinas de vectores de soporte,

así como los enfoques de Deep Learning, en particular las redes neuronales recurrentes diseñadas para el análisis de series temporales, son capaces de aprender relaciones complejas y no lineales entre las variables que influyen en el crecimiento y la productividad del cultivo. Estos modelos permiten generar estimaciones progresivamente más precisas del rendimiento final a medida que avanza la temporada de crecimiento y se dispone de nueva información, mejorando así la capacidad de ajuste y actualización de las predicciones (Liu et al., 2021).

La capacidad predictiva de la Inteligencia artificial en este contexto aporta beneficios directos a la gestión agrícola y comercial. Entre ellos se destacan una planificación más eficiente de las labores de cosecha, una gestión optimizada de inventarios y almacenamiento, y un mayor respaldo técnico para la negociación anticipada de contratos de venta. En conjunto, la predicción del rendimiento basada en IA contribuye a reducir la incertidumbre, mejorar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas y fortalecer la toma de decisiones estratégicas a lo largo de toda la cadena productiva.

8. Predicción de la madurez y calidad de la cosecha

En cultivos perecederos de alto valor comercial, como frutas y hortalizas, la predicción del momento óptimo de madurez fisiológica y la estimación precisa de la calidad intrínseca del producto constituyen factores de importancia crítica para la planificación eficiente de la cosecha y para el desempeño de la cadena de suministro postcosecha. Una cosecha realizada fuera del punto óptimo puede traducirse en pérdidas significativas por deterioro de la calidad, reducción de la vida útil y disminución del valor comercial del producto.

En este contexto, los modelos predictivos avanzados basados en Inteligencia artificial permiten integrar y analizar de manera simultánea una amplia variedad de datos relevantes para el proceso de maduración. Entre estos se incluyen el crecimiento volumétrico del fruto, las variaciones en la coloración de la epidermis, el contenido de azúcares solubles estimado

mediante sensores no destructivos, la temperatura ambiental, la radiación solar incidente y las horas de sol acumuladas a lo largo del ciclo productivo. La combinación de estas variables posibilita la construcción de modelos capaces de estimar con alta fiabilidad el estado fisiológico del fruto y determinar el momento ideal para la recolección (Benos et al., 2021).

La aplicación de estos modelos contribuye a garantizar una mayor calidad organoléptica del producto, una vida útil post-cosecha más prolongada y una reducción significativa de las pérdidas asociadas tanto a la sobre-maduración como a la cosecha prematura. Asimismo, la predicción precisa del momento de cosecha facilita la planificación logística, optimiza la programación de la mano de obra y mejora la eficiencia en los procesos de almacenamiento, transporte y comercialización. En conjunto, la Inteligencia artificial se consolida como una herramienta estratégica para maximizar el valor agregado de los cultivos perecederos y fortalecer la competitividad de las cadenas agroalimentarias.

9. Pronóstico meteorológico específico para el campo

Aunque no constituyen modelos predictivos de cultivos en sentido estricto, los modelos meteorológicos de ultra-alta resolución espacial y temporal, micro-localizados a escala de parcela, representan una fuente de información esencial para la mayoría de las aplicaciones predictivas en la agricultura de precisión. Estos modelos aportan el contexto climático necesario para interpretar correctamente la respuesta de los cultivos y para anticipar escenarios de riesgo o de oportunidad productiva.

Estos sistemas avanzados se perfeccionan de manera continua mediante la asimilación de datos provenientes de estaciones meteorológicas instaladas en campo, así como de información generada por sistemas de teledetección, tanto satelitales como basados en drones. Gracias a esta integración de datos, es posible predecir con un nivel de precisión sin precedentes fenómenos climáticos altamente localizados, como heladas tardías, tormentas convectivas severas, eventos de granizo, o periodos

prolongados de sequía o de precipitación intensa, incluso a nivel de parcela agrícola.

La disponibilidad de información climática granular resulta de importancia crítica para la toma de decisiones agronómicas estratégicas, entre ellas la programación óptima de la siembra, la selección del momento adecuado para la aplicación de fitosanitarios, la planificación del riego y la organización eficiente de las labores de cosecha. De este modo, los modelos meteorológicos de alta resolución permiten una gestión proactiva del riesgo agroclimático, reduciendo la vulnerabilidad de los cultivos y contribuyendo a una producción agrícola más resiliente y sostenible (Sishodia et al., 2020).

10. Robótica agrícola y automatización

La Inteligencia artificial constituye, en esencia, el núcleo cognitivo o la inteligencia rectora que impulsa el avance acelerado de la robótica agrícola y la automatización de tareas que históricamente han sido altamente demandantes en mano de obra dentro del sector agropecuario. Los robots agrícolas autónomos, equipados con sistemas de visión por computadora basados en IA, son capaces de ejecutar una amplia gama de operaciones con niveles de precisión inéditos, entre las que se incluyen la siembra con exactitud milimétrica, el monitoreo individualizado de plantas (plant-by-plant monitoring), la poda automatizada y selectiva, la cosecha diferenciada de frutos en su punto óptimo de madurez especialmente en cultivos delicados como fresas o manzanas y la aplicación localizada de insumos mediante rociado puntual (Shamshiri et al., 2018).

Estos sistemas robóticos no solo reducen de manera significativa la dependencia de la mano de obra humana, sino que también operan con una precisión, consistencia y eficiencia superiores a las alcanzables mediante intervención manual. Además, presentan la capacidad de trabajar de forma continua, incluso durante periodos prolongados, y de recopilar información detallada y de alta resolución durante cada operación realizada. Los datos generados por estas plataformas alimentan de forma permanente

los modelos de Inteligencia artificial, permitiendo procesos de aprendizaje y mejora continua que optimizan progresivamente el desempeño del sistema. En conjunto, la integración de IA y robótica agrícola representa un avance decisivo hacia sistemas productivos más eficientes, resilientes y tecnológicamente sofisticados.

Estos robots agrícolas están diseñados para ejecutar tareas repetitivas y de alta precisión en el entorno productivo, contribuyendo a una gestión más eficiente y tecnificada del cultivo. Entre las principales funciones que pueden desempeñar se encuentran:

- Monitoreo de cultivos, mediante la inspección continua del estado de las plantas, la detección temprana de malezas y la identificación de signos iniciales de enfermedades o estrés fisiológico.

- Aplicación de insumos, que incluye la pulverización localizada de fertilizantes o productos fitosanitarios, ajustando dosis y ubicación según las necesidades específicas del cultivo.

- Desmalezado mecánico, orientado a la eliminación física de malezas sin el uso de herbicidas químicos, lo que contribuye a la reducción del impacto ambiental.

- Recopilación de datos, a través de sensores integrados que registran información detallada sobre el suelo, el cultivo y las condiciones ambientales, la cual es utilizada para alimentar sistemas de análisis y modelos de Inteligencia artificial.

En la Figura 5 se observa un robot agrícola equipado con paneles solares que le permiten una alimentación energética autónoma, así como con antenas de comunicación que facilitan la conectividad y la transmisión de datos en tiempo real. Estas características le otorgan la capacidad de operar de manera independiente durante largos periodos y de integrarse eficientemente a los sistemas digitales de agricultura de precisión, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos.

Figura 5. *Robot agrícola autónomo.*



Fuente: Generada de IA en esta investigación

11. Asesoramiento y toma de decisiones basada en datos

Finalmente, la Inteligencia artificial se consolida como un Sistema de Apoyo a la Decisión (Decision Support System, DSS) de alto nivel para los agricultores, al integrar y analizar de manera holística la totalidad de la información generada dentro del sistema productivo. Esta integración abarca datos edáficos, climáticos, fenológicos del cultivo, registros provenientes de la maquinaria agrícola, información obtenida mediante sensores y teledetección, e incluso variables económicas asociadas a precios de mercado y costos de producción. A partir de este análisis integral, los algoritmos de IA son capaces de generar recomendaciones personalizadas, contextuales y optimizadas para cada unidad productiva.

Las recomendaciones derivadas de estos sistemas pueden incluir decisiones estratégicas como la determinación del momento óptimo para la siembra, la selección de la densidad de población de plantas más adecuada

según las condiciones específicas del suelo y el clima, la dosificación precisa de fertilizantes y productos fitosanitarios, la programación detallada del riego y, en escenarios más avanzados, la selección de variedades o cultivares mejor adaptados a las condiciones edafoclimáticas particulares de cada zona de manejo (Liu et al., 2021). De esta manera, el DSS basado en Inteligencia artificial no se limita a describir el estado del sistema, sino que orienta activamente la toma de decisiones agronómicas.

Estos sistemas de asesoramiento inteligente empoderan a los agricultores al proporcionar información predictiva, oportuna y basada en evidencia, permitiéndoles anticiparse a riesgos, aprovechar oportunidades productivas y reducir la incertidumbre inherente a la actividad agrícola. En consecuencia, la Inteligencia artificial aplicada como sistema de apoyo a la decisión contribuye de forma directa a una gestión agrícola más informada, estratégica y eficiente, orientada no solo a maximizar la productividad, sino también a fortalecer la sostenibilidad ambiental, económica y operativa de las explotaciones agrícolas.

12. Automatización de procesos agrícolas

La automatización de procesos agrícolas representa la culminación y la manifestación más avanzada de la integración sinérgica entre la Inteligencia artificial, el Big data y la robótica en el marco de la agricultura de precisión. Este concepto trasciende la optimización de tareas aisladas y se orienta hacia el diseño e implementación de sistemas ciber-físicos capaces de ejecutar operaciones agrícolas complejas con una intervención humana mínima o, en algunos casos, inexistente. Dichos sistemas operan a partir de la interpretación continua de información contextual en tiempo real y de la toma de decisiones estratégicas generadas por algoritmos inteligentes.

Esta evolución tecnológica no solo responde a la creciente escasez de mano de obra en el sector agrícola y a la necesidad de mejorar la eficiencia operativa, sino que también posibilita alcanzar niveles de precisión, repetibilidad y consistencia que resultan inalcanzables mediante métodos

manuales o mecanización convencional. En consecuencia, la automatización allana el camino hacia sistemas productivos más eficientes, rentables y sostenibles, capaces de adaptarse dinámicamente a la variabilidad espacial y temporal inherente a los agroecosistemas.

La automatización en la agricultura de precisión se sustenta en la interconexión funcional y colaborativa de varios pilares tecnológicos fundamentales como se muestra en la tabla 3:

Tabla 3. *Pilares tecnológicos de la automatización en Agricultura de precisión*

Pilar tecnológico	Rol dentro del sistema automatizado	Función específica	Ejemplos en campo	Impacto estratégico
Sensores avanzados	Órganos sensoriales del sistema	Captura continua y en tiempo real de datos ambientales, edáficos y fisiológicos.	Sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas, cámaras multiespectrales, sensores NDVI.	Permiten monitoreo preciso y detección temprana de variabilidad o estrés.
Inteligencia artificial (IA)	Núcleo cognitivo	Procesamiento, análisis e interpretación de datos; generación de decisiones autónomas.	Modelos predictivos de rendimiento, visión por computadora para detección de malezas, diagnóstico de enfermedades.	Optimiza decisiones agronómicas y reduce intervención manual.
Robótica agrícola	Componente ejecutor físico	Materializa decisiones generadas por la IA mediante operaciones mecanizadas autónomas.	Tractores autónomos, robots de deshierbe, brazos robóticos de cosecha selectiva.	Incrementa eficiencia operativa y precisión en labores agrícolas.
Sistemas GPS/GNSS	Sistema de localización espacial	Georreferenciación precisa de maquinaria, operaciones y datos recolectados.	Guiado automático, mapeo de rendimiento, delimitación de zonas de manejo.	Garantiza exactitud espacial y repetibilidad de operaciones.
Actuadores	Elementos de ejecución específica	Ejecutan físicamente las órdenes generadas por la IA.	Boquillas de pulverización variable, dosificadores de fertilizante, sistemas de riego automatizado.	Permiten aplicación sitio-específica y optimización de insumos.

Fuente: esta Investigación

La integración armónica de estos componentes permite que los sistemas automatizados perciban su entorno de forma inteligente, tomen decisiones racionales basadas en datos y ejecuten acciones con un alto grado de precisión y confiabilidad, configurando un nuevo paradigma de gestión agrícola orientado a la eficiencia productiva y la sostenibilidad a largo plazo (Shamshiri et al., 2018).

13. Ejemplos de automatización exitosos en la agricultura de precisión

La promesa de la automatización ya se ha materializado en diversas aplicaciones prácticas, con sistemas que están operando y generando valor real en explotaciones agrícolas alrededor del mundo:

A. Vehículos Agrícolas Autónomos (Tractores y Pulverizadores)

Uno de los ejemplos más representativos y de mayor impacto de la automatización en la agricultura de precisión es el desarrollo e implementación de vehículos agrícolas autónomos, particularmente tractores y pulverizadores. Empresas líderes en maquinaria agrícola como John Deere, con su modelo 8R Autonomous Tractor, y Case IH, a través de su Autonomous Concept Vehicle (ACV), han demostrado la viabilidad de vehículos capaces de ejecutar labores de campo como labranza, siembra y pulverización sin requerir la presencia permanente de un operador humano en la cabina (John Deere, 2022; Case IH, 2016).

Desde el punto de vista operativo, estos vehículos autónomos emplean una integración avanzada de tecnologías de posicionamiento y percepción del entorno. Su funcionamiento se basa en sistemas de posicionamiento global de alta precisión, como el GPS diferencial con corrección en tiempo real (RTK-GPS), combinados con sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) para el mapeo tridimensional del entorno y la detección de obstáculos. A estos se suman radares, cámaras de alta resolución y sensores ultrasónicos, los cuales permiten una navegación autónoma

segura y adaptativa. La Inteligencia artificial procesa de manera continua la información proveniente de estos sensores para definir rutas óptimas de trabajo, controlar la velocidad y la dirección del vehículo y garantizar la seguridad operativa durante toda la ejecución de la labor.

La adopción de tractores y pulverizadores autónomos conlleva múltiples beneficios a nivel productivo, económico y operativo. En primer lugar, reduce de manera significativa la dependencia de mano de obra especializada en tareas repetitivas, lo cual resulta especialmente relevante en contextos de escasez de personal rural. Además, estos vehículos pueden operar de forma continua durante las 24 horas del día, incluso en condiciones de baja visibilidad, optimizando el aprovechamiento de las ventanas operativas. Asimismo, la navegación precisa y las trayectorias optimizadas permiten una reducción en el consumo de combustible y una disminución del solapamiento entre pasadas, logrando una siembra más uniforme y una aplicación de insumos más eficiente. En conjunto, estas ventajas se traducen en incrementos de productividad, reducción de costos operativos y una mejora sustancial en la eficiencia global del sistema agrícola.

B. Rociadores de precisión con visión por computadora

La automatización, impulsada por la inteligencia artificial (IA), ha transformado de manera profunda la aplicación de herbicidas y pesticidas en los sistemas agrícolas modernos. Los rociadores de precisión con visión por computadora representan una de las innovaciones más avanzadas. La principal ventaja de estos sistemas radica en la reducción drástica del uso de herbicidas o pesticidas, que en muchos casos puede alcanzar valores cercanos al 90 %. Esta disminución se traduce en una reducción significativa de los costos asociados a insumos químicos, así como en una menor carga ambiental, al reducir la escorrentía de agroquímicos hacia cuerpos de agua y disminuir la presión de selección que favorece la aparición de resistencias en las poblaciones de malezas. Adicionalmente, estos sistemas contribuyen de manera directa a mejorar la sostenibilidad del cultivo, al minimizar

la exposición del agroecosistema y del operario a productos químicos y favorecer prácticas de manejo más precisas y responsables.

13.1 Robots de cosecha selectiva (Harvesting Robots)

Para cultivos de alto valor y aquellos que tradicionalmente dependen de una cosecha manual intensiva, como las fresas, manzanas o pimientos, los robots de cosecha selectiva están emergiendo como soluciones tecnológicamente viables y económicamente prometedoras dentro del marco de la agricultura de precisión y la automatización agrícola.

- Ejemplo en funcionamiento: Empresas especializadas como Harvest CROO Robotics, con sede en Florida, han desarrollado prototipos avanzados y sistemas comerciales de robots cosechadores de fresas. Estos sistemas integran visión por computadora y algoritmos de inteligencia artificial para identificar con alta precisión los frutos que han alcanzado su punto óptimo de madurez. Una vez detectadas, las fresas son recolectadas mediante brazos robóticos equipados con pinzas suaves y actuadores de alta precisión, diseñados para evitar daños tanto en el fruto como en la planta (Harvest CROO Robotics, 2023). De manera similar, desarrollos pioneros como los realizados por Abundant Robotics aunque la empresa ya no se encuentra en operación sentaron las bases tecnológicas para la recolección autónoma de manzanas. Asimismo, sistemas de visión avanzados implementados en huertos frutales han demostrado la viabilidad técnica y operativa de la cosecha robotizada en cultivos arbóreos (Basso & Antle, 2020).

- Beneficios: La adopción de robots de cosecha selectiva reduce de manera significativa la dependencia de mano de obra estacional, la cual suele ser escasa, costosa y difícil de asegurar en muchas regiones agrícolas. Además, estos sistemas permiten realizar la recolección en el momento óptimo de madurez fisiológica del fruto, lo que contribuye directamente a mejorar la calidad final

del producto y, en consecuencia, su valor comercial. Otro beneficio clave es la capacidad de operación continua de los robots, que pueden trabajar las 24 horas del día, los 7 días de la semana, incrementando sustancialmente la eficiencia del proceso de cosecha y la capacidad del productor para responder de forma oportuna a las exigencias y fluctuaciones del mercado (ver figura 6).

Figura 6. *Robots de Cosecha Selectiva*



Fuente: Modificado de Cosecha robótica con visión computacional - TMT News (2025)

13.2. Robots de siembra, poda y monitoreo individual de plantas

El ecosistema de la robótica agrícola no se limita exclusivamente a grandes vehículos autónomos diseñados para operar a escala de lote, ya se abordó el tema pero es imperativo recordar los beneficios de la adopción de mini-robots y plataformas robóticas de precisión que permite alcanzar un nivel de intervención sin precedentes en las operaciones agrícolas, reduciendo el estrés sobre las plantas al minimizar la manipulación innecesaria y el daño mecánico.

13.3 Sistemas de riego y fertiirrigación automatizados

Aunque la optimización del riego inteligente ha sido abordada previamente en el marco de los modelos predictivos impulsados por la Inteligencia artificial, su automatización integral representa uno de los ejemplos más claros y operativos de la IA aplicada directamente al control de procesos agrícolas. Estos sistemas demuestran la capacidad de la inteligencia artificial para gestionar, de manera autónoma, continua y eficiente, uno de los factores más críticos de la producción agrícola: el agua y la nutrición vegetal.

- Funcionamiento: En los sistemas de riego y fertiirrigación automatizados, múltiples fuentes de información convergen en una plataforma centralizada de gestión. Entre estas fuentes se incluyen estaciones meteorológicas locales que suministran datos en tiempo real, sensores de humedad del suelo instalados a distintas profundidades, estimaciones de la evapotranspiración del cultivo (ETc) derivadas de modelos agroclimáticos avanzados y pronósticos climáticos de alta resolución. La Inteligencia artificial analiza de forma continua y dinámica estos flujos de datos y, con base en este análisis, toma decisiones automáticas sobre la activación de válvulas de riego en zonas específicas del campo. De este modo, se ajustan tanto la duración como la intensidad del riego para satisfacer las necesidades hídricas precisas de cada sector, sin requerir intervención humana directa en la operación diaria (Liu et al., 2021). De manera complementaria, los sistemas de fertiirrigación automatizada permiten la inyección controlada de nutrientes disueltos en el agua de riego, dosificando de forma precisa los fertilizantes según la demanda nutricional del cultivo y su estado fenológico.

- Beneficios: La automatización del riego y la fertiirrigación genera una optimización significativa en el uso del agua y de los nutrientes, reduciendo de manera sustancial el consumo de estos recursos estratégicos. Esta eficiencia se traduce en una disminución directa

de los costos operativos, una reducción del riesgo de lixiviación y pérdidas de nutrientes, y una mitigación efectiva del estrés hídrico del cultivo al garantizar que el suministro de agua y nutrientes ocurra en el momento y en la cantidad adecuada. Como resultado, se observa una mejora consistente tanto en el rendimiento cuantitativo como en la calidad final de la cosecha, fortaleciendo la sostenibilidad productiva y ambiental del sistema agrícola.

La automatización de procesos agrícolas, respaldada por la Inteligencia artificial y el análisis de grandes volúmenes de datos (Big data), está transformando progresivamente la agricultura en una actividad de alta tecnología y elevado nivel de sofisticación. Los sistemas de riego y fertiirrigación automatizados que operan actualmente en condiciones reales de campo evidencian que lo que durante décadas fue considerado una visión futurista es hoy una realidad tangible. Esta transformación está redefiniendo las prácticas agrícolas tradicionales, impulsando la eficiencia operativa, la resiliencia productiva y la sostenibilidad ambiental hacia niveles que anteriormente resultaban inalcanzables.

13.4 Conectividad en el campo con IoT

La conectividad se erige como la columna vertebral que hace posible la integración efectiva y el funcionamiento sinérgico de la inteligencia artificial (IA) y el big data en la agricultura de precisión. Sin una infraestructura de comunicación robusta, estable y confiable que permita el flujo bidireccional de información entre sensores distribuidos en el campo, actuadores inteligentes, vehículos autónomos y plataformas de gestión centralizadas, el enorme potencial de estas tecnologías avanzadas permanecería en gran medida subutilizado. La capacidad de recopilar datos, transmitirlos en tiempo real, procesarlos de forma centralizada y devolver instrucciones al sistema productivo depende directamente de la calidad y continuidad de dicha conectividad.

En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things) emerge como el elemento estructural indispensable que sustenta la

digitalización del agro. El IoT permite que una amplia diversidad de dispositivos físicos equipados con sensores, software embebido y tecnologías de comunicación se interconecten y compartan información de manera continua a través de redes locales o de la infraestructura de internet. En el entorno agrícola, esto se traduce en la conformación de una red inteligente y dinámica de objetos interconectados capaces de monitorear variables críticas como humedad del suelo, temperatura, radiación solar, estado nutricional del cultivo o condiciones fitosanitarias, así como de accionar sistemas automatizados de riego, fertiirrigación, pulverización o cosecha en función de los datos recibidos y analizados (Liu et al., 2021).

De esta manera, el IoT no solo actúa como un canal de transmisión de datos, sino como un habilitador clave de la toma de decisiones en tiempo real, permitiendo que la agricultura de precisión evolucione desde un enfoque reactivo hacia un sistema proactivo, predictivo y altamente optimizado. La interconexión permanente entre el campo y las plataformas digitales de análisis constituye, por tanto, el cimiento tecnológico sobre el cual se construyen los sistemas agrícolas inteligentes del presente y del futuro.

14. El Rol del IoT en la agricultura de precisión

El Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura de precisión va mucho más allá de la simple conexión física entre dispositivos. Representa la construcción de un ecosistema digital inteligente, en el cual la información fluye de manera bidireccional, continua y eficiente entre el entorno físico del campo y los sistemas digitales de análisis y gestión. Este flujo permanente de datos, caracterizado por su alta frecuencia y granularidad espacial, constituye la base operativa que permite transformar la observación puntual del sistema productivo en un proceso dinámico de monitoreo, control y optimización.

Este entorno interconectado habilita una serie de funcionalidades críticas para el funcionamiento de la agricultura de precisión:

- Monitoreo en tiempo real: Los sensores habilitados mediante IoT permiten la recolección continua de datos clave del sistema

agrícola, como la humedad volumétrica del suelo, la temperatura y humedad ambiental, la disponibilidad de nutrientes, el crecimiento y desarrollo fenológico de los cultivos, la presencia y dinámica de plagas y enfermedades, así como el estado operativo, la eficiencia y el desempeño de la maquinaria agrícola. Esta capacidad de observación permanente proporciona una visión actualizada y detallada de las condiciones del campo en todo momento.

- Automatización y control remoto: La información recopilada por la red de dispositivos IoT constituye el insumo fundamental para los sistemas de inteligencia artificial y los algoritmos de apoyo a la decisión. A partir de este análisis, es posible activar de manera remota y autónoma diversos actuadores, tales como válvulas de riego, sistemas de fertiirrigación, equipos de pulverización, brazos robóticos o plataformas móviles, permitiendo una ejecución precisa y oportuna de las labores agrícolas sin necesidad de intervención humana directa.

- Análisis predictivo avanzado: El flujo continuo de datos generado por la infraestructura IoT alimenta de forma constante los modelos predictivos basados en inteligencia artificial, incrementando progresivamente su capacidad de aprendizaje y precisión. Esto posibilita la anticipación de eventos críticos, como brotes de enfermedades, condiciones de estrés hídrico que requieran riego inmediato, deficiencias nutricionales emergentes o la ocurrencia de eventos climáticos adversos, como heladas u olas de calor.

- Optimización integral de recursos: Al disponer de información precisa y en tiempo real sobre las condiciones específicas de cada zona dentro de la explotación agrícola, los productores pueden aplicar agua, fertilizantes y productos fitosanitarios de forma altamente localizada y ajustada a la demanda real del cultivo. Esta optimización reduce el desperdicio de insumos, disminuye los impactos ambientales negativos y maximiza la eficiencia productiva y económica del sistema agrícola (Wolfert et al., 2017).

En conjunto, el IoT se consolida como el componente habilitador que conecta sensores, datos, modelos predictivos y sistemas automatizados, permitiendo que la agricultura de precisión evolucione hacia un modelo de gestión inteligente, proactivo y sustentado en información en tiempo real.

15. Tecnologías de conectividad en el campo

La selección adecuada de la tecnología de conectividad es un factor crítico para el funcionamiento eficiente de la agricultura de precisión y debe basarse en un análisis cuidadoso de variables como la distancia de transmisión requerida, el consumo energético de los dispositivos, el ancho de banda necesario para los datos generados y los costos de implementación y operación. Dado el carácter heterogéneo del entorno agrícola, donde coexisten grandes extensiones abiertas, áreas remotas y espacios controlados, se han consolidado diversas opciones de conectividad, cada una con ventajas y limitaciones específicas como se ve en la tabla 4.

Tabla 4. *Tecnologías de conectividad en el campo para agricultura de precisión Tabla. Tecnologías de conectividad en el campo para agricultura de precisión*

Tecnología	Descripción	Ventajas	Desafíos	Aplicaciones en el sector agropecuario
Redes celulares (4G/5G)	Utilizan infraestructura de telefonía móvil existente. 4G ofrece buen ancho de banda y cobertura amplia. 5G proporciona velocidades ultra-altas, baja latencia y conexión masiva de dispositivos.	✓ Alta capacidad de transmisión de datos ✓ Soporta imágenes y video en alta resolución ✓ Baja latencia (5G) ideal para control en tiempo real	✗ Cobertura limitada en zonas rurales remotas ✗ Costos elevados de datos ✗ Alto consumo energético en sensores a batería	· Transmisión de imágenes y video de drones · Control remoto de maquinaria pesada · Videovigilancia de parcelas · Envío de datos en tiempo real desde estaciones meteorológicas
Redes LPWAN (LoRaWAN / NB-IoT)	Diseñadas para IoT agrícola con bajo consumo energético y transmisión de pequeños volúmenes de datos a larga distancia. LoRaWAN: opera en bandas sin licencia, permite redes privadas y largo alcance. NB-IoT: usa espectro licenciado, buena penetración en interiores y consumo ultrabajo.	✓ Muy bajo consumo energético ✓ Gran alcance (varios km) ✓ Infraestructura mínima ✓ Costos relativamente bajos (especialmente LoRaWAN)	✗ Ancho de banda limitado ✗ No aptas para video o grandes volúmenes de datos en tiempo real	· Monitoreo de humedad del suelo · Temperatura y pH · Seguimiento de ganado · Localización de maquinaria · Control de niveles en tanques

Tecnología	Descripción	Ventajas	Desafíos	Aplicaciones en el sector agropecuario
Redes Wi-Fi	Redes de alto ancho de banda para distancias cortas y entornos controlados.	✓ Alta velocidad de transmisión ✓ Hardware de bajo costo inicial	✗ Alcance limitado ✗ Alto consumo energético ✗ Susceptibles a interferencias en campo abierto	· Invernaderos · Granjas verticales · Centros de acopio · Comunicación con robots en ambientes controlados · Descarga de datos en puntos específicos
Redes satelitales (LEO)	Conectividad mediante satélites en órbita baja (Low Earth Orbit). Ideales donde no hay cobertura terrestre.	✓ Cobertura prácticamente global ✓ Indispensables en zonas extremadamente remotas	✗ Mayor latencia que redes terrestres ✗ Altos costos de terminal y servicio ✗ Consumo energético considerable	· Monitoreo de grandes extensiones ganaderas · Estaciones meteorológicas aisladas · Seguimiento de maquinaria en regiones sin infraestructura
Redes mesh (malla)	Cada dispositivo actúa como nodo que retransmite datos, extendiendo el alcance total. Comunicación descentralizada y autoajustable.	✓ Alta resiliencia y robustez ✓ Auto-reconfiguración ante fallas ✓ Adecuadas para terrenos complejos	✗ Configuración inicial compleja ✗ Aumento de latencia según número de saltos	· Sensores en topografía irregular · Coordinación de robots agrícolas · Redes distribuidas en áreas delimitadas

Fuente: Esta Investigación.

En conjunto, la elección de la tecnología de conectividad en el campo no responde a una solución única, sino a una combinación estratégica de redes que permita equilibrar cobertura, eficiencia energética, capacidad de transmisión y costos, garantizando así el funcionamiento efectivo de los sistemas IoT y de la agricultura de precisión.

16. Desafíos y barreras que aún persisten para la adopción masiva de estas tecnologías

A pesar de los avances tecnológicos alcanzados y del alto potencial inherente de la conectividad digital en el sector agropecuario, su implementación generalizada en el campo agrícola aún enfrenta desafíos significativos. La persistente falta de infraestructura de telecomunicaciones robusta en amplias zonas rurales de Colombia y de otras regiones en desarrollo continúa siendo una de las principales barreras para la adopción efectiva de tecnologías basadas en IoT, inteligencia artificial y big data (Rose et al., 2021). Sin una conectividad confiable y continua, el flujo de datos en tiempo real se ve comprometido, limitando la funcionalidad de los sistemas automatizados y reduciendo el impacto potencial de la agricultura de precisión.

Otro desafío relevante es la interoperabilidad entre los distintos protocolos de comunicación y los dispositivos IoT provenientes de múltiples fabricantes. La ausencia de estándares comunes dificulta la integración de datos en plataformas unificadas y la construcción de ecosistemas digitales verdaderamente cohesionados y eficientes. A esto se suma la creciente preocupación por la seguridad cibernética, ya que las redes agrícolas conectadas, al igual que cualquier infraestructura digital, son susceptibles a ataques maliciosos que pueden comprometer la integridad de la información, la privacidad de los datos o incluso la continuidad de operaciones autónomas críticas. Asimismo, la gestión eficiente de la energía en dispositivos que deben operar de forma autónoma durante largos periodos, muchas veces

en condiciones ambientales adversas, constituye un aspecto clave para la sostenibilidad operativa de los sistemas IoT en el campo.

El futuro de la conectividad en la agricultura de precisión probablemente estará marcado por la adopción de esquemas híbridos, en los que diferentes tecnologías de comunicación se combinen estratégicamente para responder a las necesidades específicas de cada aplicación y de cada subzona dentro del sistema productivo. La expansión progresiva de redes 5G hacia zonas rurales, el desarrollo continuo de nuevos estándares LPWAN y la reducción gradual de los costos asociados a las comunicaciones satelitales prometen cerrar la brecha de conectividad existente. Este proceso permitirá avanzar hacia una agricultura cada vez más interconectada, inteligente y autónoma, con mayores niveles de equidad territorial.

A pesar del enorme potencial transformador demostrado por la inteligencia artificial y el big data en la agricultura de precisión, su adopción masiva a escala global enfrenta barreras de carácter tecnológico, económico, social e institucional que deben ser abordadas de manera integral como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. *Desafíos en la adopción de agricultura de precisión e inteligencia artificial en el sector agropecuario*

Nº	Desafío	Descripción técnica	Impacto en el sistema productivo	Implicaciones estratégicas
1	Brecha de conectividad e infraestructura rural	Insuficiente cobertura de redes 4G/5G en amplias zonas rurales, especialmente en Suramérica.	Limita transmisión de datos, acceso a plataformas en la nube y operación de maquinaria autónoma. Amplía la brecha digital entre productores.	Necesidad de inversión en infraestructura digital rural, redes híbridas (LPWAN + satelital) y políticas públicas de conectividad.
2	Costo inicial y retorno de la inversión (ROI)	Alta inversión inicial en sensores, drones, maquinaria autónoma y software especializado.	Retrasa adopción en pequeños y medianos productores. Percepción de riesgo financiero elevado.	Desarrollo de esquemas de financiamiento, subsidios, cooperativas tecnológicas y modelos de agricultura como servicio (AaaS).
3	Complejidad tecnológica y falta de capacitación	Requiere competencias en IA, análisis de datos y gestión digital que muchos agricultores no poseen.	Subutilización de tecnologías, errores en interpretación de datos y baja eficiencia en toma de decisiones.	Programas de capacitación rural, extensión digital, formación en agronomía de datos y asistencia técnica especializada.
4	Interoperabilidad y estandarización de datos	Ecosistema fragmentado con plataformas cerradas y formatos propietarios que generan silos de información.	Dificulta integración de datos de sensores, maquinaria, clima y mercado para análisis integral.	Impulso a estándares abiertos, plataformas interoperables y gobernanza de datos agrícolas.

Nº	Desafío	Descripción técnica	Impacto en el sistema productivo	Implicaciones estratégicas
5	Privacidad, propiedad y seguridad de datos	Incertidumbre sobre propiedad, uso y monetización de datos agrícolas generados por productores.	Desconfianza para compartir información y limitación del potencial del Big data agrícola.	Desarrollo de marcos regulatorios claros, contratos transparentes y sistemas de ciberseguridad agrícola.
6	Resistencia al cambio y percepción de riesgo	Barreras culturales en sistemas tradicionales y escepticismo frente a beneficios reales.	Baja tasa de adopción y lentitud en modernización productiva.	Implementación de parcelas demostrativas, casos de éxito locales y validación económica comprobable.
7	Complejidad y heterogeneidad de sistemas agrícolas	Diversidad edafoclimática y productiva exige modelos altamente adaptables.	Modelos de IA no siempre transferibles entre regiones; necesidad de calibraciones locales.	Desarrollo de modelos regionalizados, sistemas adaptativos y bases de datos georreferenciadas robustas.

Fuente: Modificado de Kamilaris et al., (2017); Wolfert et al., (2017); Lowenberg-DeBoer & Erickson, (2019); Basso & Antle, (2020); Sishodia et al., (2020); Rose et al., (2021).

Superar estos desafíos requiere un enfoque colaborativo que involucre a gobiernos, instituciones de investigación, empresas tecnológicas y agricultores. La inversión en infraestructura digital rural, el desarrollo de soluciones tecnológicas accesibles y adaptadas, la promoción de estándares abiertos y la capacitación continua de los productores son elementos esenciales para una transformación digital inclusiva y efectiva.

En síntesis, la integración de la inteligencia artificial y el big data en la agricultura de precisión no constituye una tendencia pasajera, sino una transformación estructural que está redefiniendo los paradigmas de producción agrícola a nivel global. La combinación de sensores, maquinaria conectada, plataformas IoT y modelos de IA ha permitido avanzar desde la recopilación pasiva de datos hacia la toma de decisiones proactiva y la automatización inteligente de procesos agrícolas.

La conectividad habilitada por el IoT actúa como el sistema nervioso que articula todos estos componentes, facilitando el flujo continuo de información entre el campo y los sistemas de análisis. Si bien persisten barreras importantes, el camino hacia una agricultura más inteligente, eficiente y sostenible es irreversible. La digitalización agrícola promete no solo mejorar la rentabilidad y la eficiencia productiva, sino también reducir de manera significativa el impacto ambiental mediante un uso más racional del agua, los fertilizantes y los pesticidas.

En última instancia, la adopción estratégica de la inteligencia artificial y el big data en la agricultura de precisión constituye un paso decisivo hacia la resiliencia del sistema agroalimentario y la seguridad alimentaria global, permitiendo que la agricultura del futuro sea más adaptable, productiva y en armonía con el medio ambiente.

Síntesis final

La evolución tecnológica presentada a lo largo de los capítulos anteriores alcanza en este punto su mayor nivel de sofisticación conceptual

y operativa. Si en el Capítulo 9 se estableció la base científica para la optimización del riego mediante modelos agroclimáticos robustos y en el Capítulo 10 se estructuró la arquitectura digital fundamentada en IoT, sensores remotos, Big data e interoperabilidad de datos, en este Capítulo 11 se consolida la transición hacia una agricultura verdaderamente inteligente, donde los sistemas no solo capturan y procesan información, sino que aprenden de ella, generan patrones, anticipan escenarios y ejecutan decisiones automatizadas con base en modelos predictivos avanzados.

La Inteligencia artificial aplicada a los sistemas agro productivos representa un cambio paradigmático desde una gestión reactiva hacia una gestión predictiva y adaptativa. En términos técnicos, implica integrar algoritmos de Machine Learning supervisado y no supervisado, redes neuronales profundas, modelos de clasificación, regresión multivariable, análisis de series temporales y arquitecturas híbridas que combinan principios ecofisiológicos con aprendizaje automático. Esta convergencia permite modelar el sistema suelo–planta–atmósfera como un sistema dinámico no lineal, donde variables como evapotranspiración del cultivo, coeficientes de estrés hídrico, disponibilidad nutricional, carbono orgánico, CE, radiación fotosintéticamente activa, microclima bajo sombra y variables espectrales como el NDVI interactúan simultáneamente. La capacidad de estos modelos para capturar relaciones complejas, interdependencias y efectos no lineales supera los enfoques estadísticos tradicionales, permitiendo estimaciones más precisas del rendimiento, del riesgo fitosanitario y de la eficiencia en el uso de recursos.

La incorporación de arquitecturas de edge computing y cloud computing reduce la latencia en la toma de decisiones y facilita el procesamiento en tiempo real de grandes volúmenes de datos provenientes de sensores de suelo, estaciones meteorológicas, drones y satélites. De esta manera, la finca deja de ser únicamente un espacio productivo y se transforma en un sistema ciber físico, donde lo biológico y lo digital convergen en una estructura integrada de monitoreo, análisis y acción. La automatización inteligente, apoyada en visión computacional y robótica

agrícola, permite detección selectiva de malezas, aplicación variable de insumos, ajuste dinámico del riego y generación de mapas prescriptivos basados en probabilidades y escenarios simulados previamente mediante gemelos digitales. Este último concepto introduce la posibilidad de evaluar impactos productivos, económicos y ambientales antes de intervenir el sistema real, reduciendo riesgos y optimizando inversiones.

En sistemas agroforestales tropicales, caracterizados por alta heterogeneidad edáfica, variabilidad micro climática inducida por estratificación arbórea y dinámicas complejas de materia orgánica y biodiversidad del suelo, la Inteligencia artificial adquiere un valor estratégico excepcional. La modelación predictiva permite estabilizar rendimientos interanuales, mejorar la eficiencia del uso del agua, reducir la sobre fertilización nitrogenada y con ello las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero, y anticipar brotes de enfermedades bajo escenarios climáticos cambiantes. La agricultura inteligente no solo optimiza la rentabilidad; fortalece la resiliencia frente a la variabilidad climática y contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante una gestión más racional de los recursos.

Este proceso marca la transición definitiva desde una agricultura basada en insumos hacia una agricultura basada en conocimiento. La precisión permitió aplicar lo correcto en el lugar correcto; la digitalización permitió medirlo y registrarlo todo; la Inteligencia artificial permite ahora anticipar lo que ocurrirá y actuar antes de que los efectos negativos se manifiesten. La información se convierte así en el principal activo productivo y la capacidad de predicción en la mayor ventaja competitiva del productor moderno. Lejos de sustituir el criterio agronómico, la Inteligencia artificial lo potencia mediante análisis probabilístico avanzado, reducción de incertidumbre y soporte cuantitativo para la toma de decisiones complejas.

En un contexto global de cambio climático, presión sobre los recursos hídricos, degradación de suelos y necesidad de aumentar la productividad sin expandir la frontera agrícola, la agricultura inteligente se posiciona

como una herramienta imprescindible. La integración de agromática avanzada, modelación ecofisiológica, analítica de Big data, automatización robótica e Inteligencia artificial explicable configura el nuevo estándar tecnológico del sector agro productivo. La finca del futuro será un sistema interconectado, adaptativo y capaz de aprender de su propio comportamiento histórico, ajustando dinámicamente su manejo para maximizar eficiencia, sostenibilidad y resiliencia. En esta convergencia tecnológica se define no solo la modernización del agro, sino su viabilidad estratégica en las próximas décadas.

Ejercicios prácticos y de discusión

a. Diseñe un modelo predictivo para rendimiento de cacao incorporando variables fisiológicas.

b. ¿Qué variables incluiría para predecir estrés hídrico en tiempo real?

c. Compare un sistema tradicional vs uno con IA en términos de:

- Eficiencia hídrica
- Impacto ambiental
- Rentabilidad

D. ¿Cuáles son los riesgos éticos del uso masivo de IA en agricultura?

E. Plantee un esquema de gemelo digital para una finca agroforestal de 10 ha.

Ejercicio 1: Diseño de un sistema de monitoreo inteligente para un cultivo local.

Objetivo: Aplicar los conceptos de sensores, IoT y Big data para diseñar una solución específica.

Descripción: Pasto, Nariño, es conocido por sus diversos cultivos como la papa, el maíz y hortalizas. Imaginen que son consultores de agrotecnología y un grupo de agricultores de la región les ha pedido diseñar un sistema de monitoreo inteligente para un cultivo de papa de 50 hectáreas. Los agricultores desean optimizar el uso del agua, detectar enfermedades tempranamente y monitorear el crecimiento del cultivo.

Tareas:

1. Identificación de datos: ¿Qué tipos de datos necesitarían recopilar para abordar los objetivos de los agricultores? (ej. humedad del suelo, temperatura, imágenes, etc.)

2. Tecnologías de recopilación: ¿Qué sensores y plataformas (drones, sensores in situ, estaciones meteorológicas) específicos recomendarían y por qué?

3. Conectividad (IoT): Dada la geografía y la probable infraestructura de conectividad en Pasto, ¿qué tecnologías de IoT (LoRaWAN, 4G/5G, satelital, etc.) serían las más adecuadas para transmitir los datos de los sensores al centro de análisis? Justifiquen su elección.

4. Gestión de datos: ¿Cómo asegurarían que los datos recopilados sean accesibles y estén organizados para su posterior análisis por IA? ¿Qué tipo de plataforma de almacenamiento recomendarían?

Preguntas para la discusión:

- ¿Qué desafíos específicos de conectividad podrían encontrar en las zonas rurales de Nariño al implementar este sistema y cómo los mitigarían?

- ¿Cómo se podría escalar esta solución para abarcar múltiples fincas de papa en la región?

Ejercicio 2: Análisis de casos de uso de IA para problemas locales

Objetivo: Conectar las aplicaciones teóricas de la IA con problemáticas agrícolas reales y específicas.

Descripción: En la región de producción de papa, los agricultores a menudo se enfrentan a desafíos como plagas específicas (ej. la polilla guatemalteca en la papa), enfermedades fúngicas debido a la alta humedad, y la variabilidad de los precios de mercado.

Tareas:

1. Selección de Problema: Elijan uno de los siguientes problemas agrícolas comunes en el cultivo:

- Manejo de la polilla guatemalteca en el cultivo de papa.
- Predicción de brotes de tizón tardío en papa o mildiu en hortalizas.
- Optimización de la oferta y demanda para estabilizar los precios de productos clave en el mercado local.

2. Aplicación de IA: Describan cómo un modelo predictivo basado en IA podría abordar el problema seleccionado.

3. Fuentes de Datos: ¿Qué tipos de Big data necesitarían para entrenar y operar este modelo de IA?

4. Toma de Decisiones: ¿Qué tipo de decisiones prácticas y recomendaciones generaría este modelo para los agricultores?

Preguntas para la discusión:

- ¿Qué tan «inteligente» tendría que ser el sistema de IA para generar confianza en los agricultores locales?

- ¿Cuáles son las implicaciones éticas de usar modelos predictivos de IA para influir en las decisiones de siembra o cosecha de los agricultores?

Ejercicio 3: Evaluación de la viabilidad económica y social

Objetivo: Reflexionar sobre las barreras de adopción y proponer soluciones.

Descripción: Un agricultor promedio que cultiva 5 hectáreas de maíz, está interesado en la agricultura de precisión, pero le preocupan los costos y la complejidad.

Tareas:

1. Barreras identificadas: Desde la perspectiva del agricultor, identifiquen las principales barreras económicas, tecnológicas y sociales para adoptar la IA y el Big data.

2. Propuestas de mitigación: Propongan al menos tres estrategias concretas (ej. modelos de negocio, subsidios, programas de capacitación) que podrían implementar las universidades, el gobierno local o las empresas de tecnología para facilitar la adopción por parte de este agricultor.

3. Análisis costo-beneficio (cualitativo): ¿Cómo argumentarían el retorno de la inversión a largo plazo para este agricultor, más allá de los costos iniciales?

Preguntas para la discusión:

- ¿Qué papel pueden jugar las cooperativas agrícolas en la democratización del acceso a estas tecnologías?

- ¿Cómo se puede asegurar que los beneficios de la agricultura de precisión lleguen a todos los agricultores y no solo a los grandes productores?

Ejercicio 4: Desafíos de integración de datos y propuestas de solución

Objetivo: Abordar el problema de la interoperabilidad en la práctica.

Descripción: Un agricultor utiliza un tractor de la marca X, sensores de humedad de la marca Y un servicio de imágenes de drones de la marca Z. Cada uno genera datos en formatos diferentes y usa plataformas distintas.

Tareas:

1. Problema de interoperabilidad: Describan el problema concreto que enfrenta este agricultor al intentar integrar y analizar sus datos.

2. Soluciones tecnológicas: Investigue y proponga al menos dos soluciones tecnológicas para superar esta interoperabilidad (ej. APIs, estándares de datos abiertos, plataformas integradoras).

3. Rol de la estandarización: Discutan la importancia de la estandarización en el sector agro-tecnológico y quiénes deberían impulsar estos estándares.

Preguntas para la discusión:

- ¿Qué riesgos de «bloqueo de proveedor» (vendor lock-in) existen en la agricultura de precisión debido a la falta de interoperabilidad?

- ¿Cómo se puede incentivar a las empresas de tecnología a adoptar estándares abiertos en lugar de formatos propietarios?

Ejercicio 5: El Futuro de la Agricultura Autónoma

Objetivo: Fomentar el pensamiento prospectivo y la discusión sobre el impacto a largo plazo de la automatización.

Descripción: Imaginen un escenario dentro de 10 años donde la automatización en la agricultura de precisión es generalizada en Suramérica.

Tareas:

1. Escenario Futuro: Describan cómo serían las operaciones diarias en una finca promedio de la región, destacando el rol de la IA y la robótica autónoma.

2. Impacto en el Empleo: ¿Qué impacto tendría esta automatización en la mano de obra agrícola? ¿Se perderían empleos o se transformarían? ¿Surgirían nuevos roles?

3. Roles de la Universidad: ¿Qué nuevas áreas de estudio o programas de capacitación debería ofrecer una universidad en algún país suramericano para preparar a los futuros profesionales para este escenario?

Preguntas para la discusión:

- ¿Qué medidas sociales y económicas serían necesarias para gestionar la transición hacia una agricultura más automatizada sin dejar a nadie atrás?

- ¿Podría la automatización de la agricultura en Suramérica contribuir a la seguridad alimentaria de una manera más efectiva que los métodos actuales?

Referencias

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability,* 3(4), 254–256. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0

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), 3758. https://doi.org/10.3390/s21113758

Case IH. (2016). *Autonomous concept vehicle.* https://www.caseih.com

Davenport, T. H. (2014). Big data at work: *Dispelling the myths, uncovering the opportunities.* Harvard Business Review Press.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning. MIT Press.* https://www.deeplearningbook.org/

Harvest CROO Robotics. (2023). *Autonomous strawberry harvesting robots.* https://harvestcroo.com/

IBM. (2013). *What is big data?* IBM. https://www.ibm.com/think/topics/big-data

John Deere. (2022). *Autonomous tractor.* John Deere. https://www.deere.com

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

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors,* 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2021). From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* 17(6), 4322–4334. https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910

Lottes, P., Khanna, R., Pfeifer, J., Siegwart, R., & Stachniss, C. (2018). UAV-based crop and weed classification for smart farming. *IEEE Robotics and Automation Letters,* 3(4), 3024–3031. https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2849508

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

Mandal, S., Rakesh, V. y Maheshwari, P. (2020). Machine learning applications in agriculture: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 105(4), 831–84. https://doi.org/10.1007/s00607-022-01057-6

Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2013). *Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think.* Houghton Mifflin Harcourt.

Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning. McGraw-Hill.*

Pramanik, M., Pal, S., & Mitra, S. (2019). Artificial intelligence in agriculture: A review. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering,* 8(9), 1897–1902.

Regional Digital. (2025). *La agricultura digital y la automatización en el campo.* https://regionaldigital.com/agricultura-digital-automatizacion/

Rose, D. C., Lyon, J., de Boon, A., Hanheide, M., & Pearson, S. (2021). Responsible development of autonomous robotics in agriculture. *Nature Machine Intelligence,* 3, 306–309. https://doi.org/10.1038/s42256-021-00331-6

Russell, S., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: A modern approach* (3rd ed.). Pearson.

Sağıroğlu, Ş., & Sinanc, D. (2013). Big data: A review [Conferencia]. In 2013 *International Conference on Collaboration Technologies and Systems* (CTS). San Diego, California, EE. UU. https://doi.org/10.1109/CTS.2013.6567202

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering,* 11(1), 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

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

SmartPanel. (2018, 10 de abril). *¿Qué es el deep learning?* https://www.smartpanel.com/que-es-deep-learning/

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature,* 418, 671–677. https://doi.org/10.1038/nature01014

TMT News. (2025, 23 de junio). Cosecha robótica con visión computacional: *La agricultura entra en una nueva era.* https://tmt-news.com/cosecha-robotica-con-vision-computacional-la-agricultura-entra-en-una-nueva-era/

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

Capítulo 4

Aspectos económicos y retorno de inversión de la Agricultura de Precisión - AP



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

1. Analizar la rentabilidad de tecnologías de Agricultura de precisión.
2. Calcular indicadores financieros aplicados a inversiones agrícolas.
3. Evaluar retorno de inversión (ROI) en sensores, drones, VRT e IA.
4. Comparar sistemas tradicionales vs sistemas con AP desde perspectiva económica.
5. Diseñar modelos de evaluación financiera para fincas agroforestales.
6. Interpretar riesgo económico asociado a innovación tecnológica agrícola.

Conceptos clave

- Retorno de Inversión (ROI): Indicador financiero que mide la rentabilidad relativa de una inversión. Se expresa como el porcentaje de ganancia o ahorro generado respecto al capital invertido.

$$ROI = \frac{\textbf{Beneficio neto}}{\textit{Inversion Total}} * 100$$

- Valor Actual Neto (VAN): Es el valor presente de los flujos de caja futuros descontados a una tasa determinada menos la inversión inicial. Un VAN positivo indica viabilidad económica.

$$VAN = \sum \frac{Flujo\ de\ caja}{(1+i)^t} - Inversion\ inical$$

- Tasa Interna de Retorno (TIR): Es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Representa la rentabilidad implícita del proyecto.

- Periodo de Recuperación (PRI): Tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los flujos netos generados.
- Costos variables y costos fijos en AP
  - Fijos: adquisición de drones, sensores, software.
  - Variables: mantenimiento, suscripciones, capacitación, calibraciones.
- Intensificación tecnológica rentable: Proceso mediante el cual la adopción de tecnología aumenta productividad o reduce costos en mayor proporción que el incremento en inversión.
- Economías de escala digital: Reducción del costo promedio por hectárea a medida que aumenta el área bajo manejo de AP.
- Análisis de sensibilidad: Evaluación del impacto que tienen variaciones en precio, rendimiento o costos sobre los indicadores financieros.

Desarrollo técnico

Aspectos económicos y retorno de inversión de la agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) trasciende la mera catalogación de una tendencia tecnológica emergente; se configura, en esencia, como una revolución silenciosa que está redefiniendo fundamentalmente el porvenir del sector agrícola a escala global. Durante varias décadas, la práctica agrícola ha operado predominantemente bajo un enfoque de "uniformidad generalizada" caracterizado por la aplicación homogénea y estandarizada de insumos a vastas extensiones de terreno cultivable. Sin embargo, los campos agrícolas, en su intrínseca naturaleza, raramente exhiben homogeneidad; por el contrario, manifiestan variaciones significativas y espacialmente

explícitas en atributos críticos como la fertilidad edáfica, el contenido de humedad del suelo, las características topográficas del terreno y la incidencia localizada de plagas o enfermedades fitosanitarias. Esta heterogeneidad, cuando se gestiona con un enfoque uniforme, conlleva inherentemente a una ineficiencia operativa que se traduce en un uso subóptimo de los recursos disponibles, una huella ambiental que excede lo necesario y, en última instancia, en una erosión progresiva de la rentabilidad para los productores agrícolas.

Es precisamente en este contexto de desafíos intrínsecos y oportunidades latentes que la Agricultura de precisión emerge como una disciplina habilitadora. Permite a los agricultores no solo comprender de manera profunda, sino también gestionar activamente la variabilidad inherente dentro de sus campos, operando a una escala granular y sin precedentes. Ya no se trata de aplicar una cantidad estandarizada de fertilizante a cada hectárea de terreno cultivado, sino de la capacidad de suministrar la dosis precisa de dicho insumo donde y cuando es requerida, optimizando de este modo cada mililitro de agua, cada semilla individual y cada gramo de nutriente.

Más allá de la sofisticación tecnológica intrínseca, el verdadero motor propulsor y catalizador de la adopción generalizada de la Agricultura de precisión reside en su impacto económico tangible y cuantificable. Si bien la inversión inicial necesaria para la adquisición de equipos de alta tecnología y licencias de software especializado puede ser percibida como una barrera económica de entrada significativa, un análisis profundo y metodológicamente robusto revela que los beneficios financieros derivados de la mejora sustancial en la eficiencia operativa, la reducción de costos de producción y el incremento en la productividad superan con creces estos desembolsos iniciales. Este segmento se adentrará en el núcleo económico de la Agricultura de precisión, desglosando los múltiples flujos de ingresos adicionales y los ahorros sustanciales que esta disciplina genera, y proporcionando un marco analítico claro para comprender y cuantificar el Retorno de Inversión (ROI) que la AP ofrece. Se explorará cómo esta

disciplina no solo maximiza la rentabilidad económica individual del agricultor, sino que también allana el camino hacia una agricultura que es simultáneamente más sostenible, eficientemente productiva y resiliente frente a los desafíos globales impuestos por la creciente demanda de producción de alimentos y los efectos del cambio climático.

1. Costos de implementación de la agricultura de precisión

La implementación de la agricultura de precisión (AP) implica la realización de inversiones significativas en tecnología, programas de capacitación especializada para el personal y el mantenimiento continuo de los equipos. Los costos iniciales asociados a esta implementación pueden exhibir una variabilidad considerable, dependiendo directamente de la escala de la operación agrícola y de las tecnologías específicas que sean seleccionadas para su integración. Por ejemplo, la adquisición e instalación de sistemas de guía automática de alta precisión para maquinaria agrícola puede representar costos iniciales que oscilan entre $20,000 y $60,000 USD, una variabilidad que se explica por la precisión requerida y el tipo específico de sistema adoptado (Robertson et al., 2012). Adicionalmente, es imperativo considerar los costos recurrentes que se asocian intrínsecamente con el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos, así como con las actualizaciones periódicas del software, las cuales son esenciales para mantener la funcionalidad y la relevancia tecnológica del sistema.

Es fundamental comprender que estos costos no son estáticos, sino que manifiestan una variación significativa en función del nivel de adopción de la AP y de la escala operativa de la explotación agrícola (Smith & Jones, 2020). Sin embargo, centrarse exclusivamente en la magnitud de la inversión inicial constituiría una perspectiva analítica limitada. El verdadero valor económico de la Agricultura de precisión reside, fundamentalmente, en la optimización intrínseca de los recursos y en el incremento exponencial de la eficiencia operativa, lo cual se traduce directamente en ahorros financieros significativos y en mayores rendimientos productivos (Muñoz et al., 2019). Los beneficios económicos derivados de la implementación de la AP pueden categorizarse y desglosarse de la siguiente manera:

- Reducción de costos de insumos:
  - Fertilizantes: La aplicación variable de fertilizantes, fundamentada en mapas de prescripción generados a partir de análisis geoespaciales del suelo y lecturas de sensores remotos, previene de manera efectiva la sobre-aplicación en áreas que presentan una alta fertilidad inherente y la sub-aplicación en zonas deficitarias. Este enfoque de precisión puede generar ahorros cuantificables que oscilan entre el 15% y el 20% en fertilizantes nitrogenados y fosforados, un impacto financiero que es considerable para el presupuesto operativo (González et al, 2021).
  - Agua: Los sistemas de riego de precisión, que dimensionan las necesidades hídricas específicas de cada sub-zona del campo (determinadas por sensores de humedad del suelo, imágenes satelitales o datos de drones), minimizan drásticamente el desperdicio de agua, un factor de criticidad elevada en regiones que enfrentan escasez hídrica. Ahorros del 10% al 30% en el consumo de agua son consistentemente reportados en la literatura técnica (García & Rodríguez, 2018).
  - Agroquímicos (herbicidas, fungicidas, insecticidas): La aplicación selectiva y espacialmente localizada de productos fitosanitarios, utilizando mapeo detallado de malezas o de la incidencia de enfermedades, reduce drásticamente la cantidad total de producto químico utilizado. Esta práctica no solo genera ahorros económicos sustanciales, sino que también minimiza el impacto ambiental negativo asociado a la dispersión de químicos (Chen et al., 2022).
  - Semillas: La implementación de la siembra de tasa variable permite ajustar la densidad de siembra a la capacidad productiva intrínseca de cada microambiente dentro del campo. Esto evita la sobre-densidad en áreas de bajo potencial productivo y la

sub-densidad en zonas de alto potencial, optimizando de este modo el uso de semillas, que representan un costo significativo (Silva & Costa, 2020).

- Aumento de la productividad y los rendimientos:
  - Mediante la optimización rigurosa de la aplicación de insumos, se asegura que cada planta individual reciba exactamente lo que necesita, en el momento preciso en que lo necesita, maximizando así su potencial genético inherente. Esto se traduce directamente en un incremento cuantificable de los rendimientos por hectárea, que puede oscilar entre el 5% y el 15%, dependiendo de las particularidades del cultivo y de las condiciones edáficas y climáticas iniciales del campo (Wang et al., 2017).
  - La corrección sistemática de problemas específicos del suelo (como la compactación, o las deficiencias de nutrientes) a través de prácticas de agricultura de precisión contribuye a mejorar la salud edáfica a largo plazo y, consecuentemente, a incrementar la productividad sostenida del sistema (Brown & Davis, 2019).
- Eficiencia operativa y ahorro de tiempo:
  - La automatización de procesos agrícolas y la guía asistida por GPS reducen de manera significativa el solapamiento en las operaciones de campo (tales como la siembra, la fertilización y la pulverización), lo que se traduce directamente en un menor consumo de combustible y una reducción del desgaste mecánico de la maquinaria, extendiendo su vida útil (Miller & White, 2021).
  - La planificación optimizada de rutas y la disminución del número de pasadas necesarias en el campo reducen las horas de trabajo requeridas tanto para el operario como para la maquinaria, liberando tiempo valioso que puede ser reasignado a otras actividades estratégicas o permitiendo el cultivo de una mayor

extensión de hectáreas con la misma flota de equipos (Díaz & López, 2023).

- Mejora en la toma de decisiones estratégicas:
  - La recopilación sistemática de datos georreferenciados y la generación de mapas detallados de rendimiento, CE del suelo, biomasa vegetal, entre otros parámetros, proporcionan información de valor incalculable para una toma de decisiones de manejo más informada, precisa y proactiva a nivel de cada lote o sub-lote. Esto facilita la identificación de áreas problemáticas, la evaluación rigurosa de la efectividad de las prácticas agrícolas implementadas y la planificación de futuras intervenciones con un mayor grado de certidumbre y optimización (Johnson et al., 2022).
- Valorización de la tierra y acceso a mercados diferenciados:
  - Una explotación agrícola gestionada con los principios y tecnologías de la Agricultura de precisión es intrínsecamente más eficiente y productiva. Esta eficiencia superior puede contribuir a un incremento tangible en su valor de mercado. Adicionalmente, la trazabilidad mejorada de los productos y la sostenibilidad inherente a las prácticas de AP pueden abrir puertas a mercados que valoran de manera creciente la producción agrícola responsable, certificada y con una menor huella ambiental (Vega & Rojas, 2021).

2. Cuantificando el retorno de inversión (ROI) en la agricultura de precisión

El retorno de inversión (ROI) constituye una métrica financiera de primordial importancia para la evaluación rigurosa de la rentabilidad de cualquier capital invertido (Brigham & Houston, 2017). Su cálculo se efectúa mediante la siguiente fórmula:

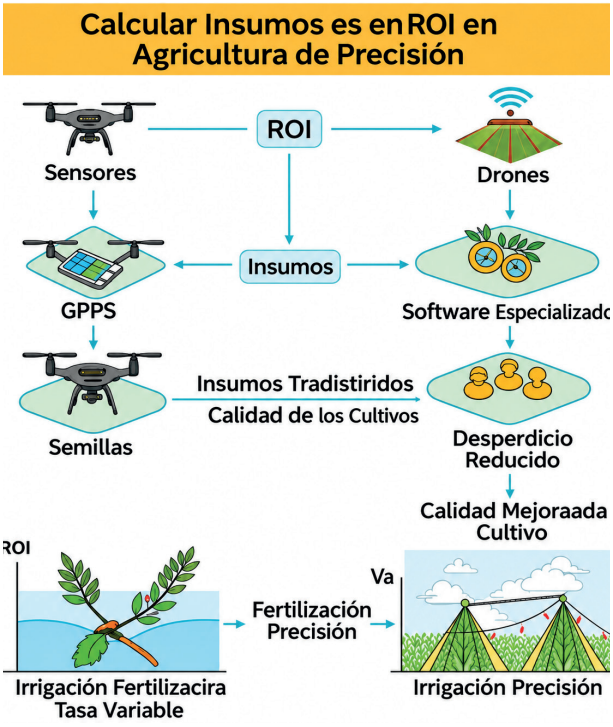
$$ROI = \frac{Beneficio\ neto\ de\ la\ inversión - Costo\ de\ la\ inversión}{Costo\ de\ la\ inversión}\ x\ 100\%$$

Para aplicar esta fórmula a la AP, debemos considerar:

- Beneficio neto de la inversión: Representa la suma de todos los ahorros generados (en insumos, combustible, tiempo) más el valor de los incrementos en rendimiento, menos los costos operativos adicionales de la AP (ej. suscripciones de software, mantenimiento de sensores).

- Costo de la inversión: Incluye el costo total de adquisición de la tecnología de AP (hardware y software), más los costos de instalación y capacitación inicial (Ver figura 1).

Figura 1. *Calculo del ROI en agricultura de precision*



Fuente: Generada de IA en esta investigación

Ejemplo práctico de cálculo de ROI:

Consideremos una explotación agrícola de 500 hectáreas dedicada al cultivo de maíz, que decide implementar un paquete básico de AP en dólares que incluye:

- Inversión Inicial:
  - Sistema de guía GPS con piloto automático para un tractor: $15,000
  - Monitor de rendimiento: $5,000
  - Software de gestión de datos y creación de mapas: $2,000 (suscripción anual, consideramos el primer año)
  - Capacitación: $1,000
  - Costo Total de la Inversión (Año 1): $23,000
- Beneficios Anuales Estimados:
  - Ahorro en Fertilizantes: 10% de ahorro en un costo de fertilizantes de $200/ha = $20/ha. Para 500 ha = $10,000.
  - Ahorro en Agroquímicos: 15% de ahorro en un costo de agroquímicos de $80/ha = $12/ha. Para 500 ha = $6,000.
  - Ahorro en combustible y desgaste de maquinaria (por reducción de solapamiento y eficiencia): Estimado en $5/ha. Para 500 ha = $2,500.
  - Aumento de Rendimiento: 5% de incremento en un rendimiento base de 8 ton/ha, con un precio de venta de $200/ton.
    - Incremento por ha: (8 ton * 0.05) = 0.4 ton/ha.

- Valor del incremento por ha: 0.4 ton * $200/ton = $80/ha.
- Valor total del incremento: $80/ha * 500 ha = $40,000.
  - Beneficios anuales totales: $10,000 + $6,000 + $2,500 + $40,000 = $58,500.

- Cálculo del ROI (Año 1):
  - ROI = (($58,500 - $23,000) / $23,000) * 100%
  - ROI = ($35,500 / $23,000) * 100%
  - ROI ≈ 154.35%

Este ejemplo ilustra de manera contundente un Retorno de Inversión considerable y positivo en el primer año de implementación. Es crucial señalar que el ROI puede variar significativamente y su magnitud dependerá de factores específicos como el tamaño de la explotación agrícola, el tipo de cultivo, las fluctuaciones en los precios de los insumos y los productos agrícolas, el nivel de adopción tecnológica de la AP y la habilidad del productor para integrar y utilizar de manera efectiva la vasta cantidad de información generada por los sistemas de precisión (Adams & Baker, 2020).

3. Plazo de recuperación de la inversión (Payback Period):

Otro indicador económico de gran relevancia para la toma de decisiones es el plazo de recuperación de la inversión (Payback Period), el cual cuantifica el tiempo que requerirá la inversión para generar suficientes flujos de efectivo que permitan cubrir su costo inicial. En el ejemplo previamente detallado, con un beneficio anual estimado de $58,500 USD y una inversión inicial de $23,000 USD, el plazo de recuperación sería notablemente inferior a un año, lo que demuestra una rápida amortización de la inversión.

3.1 Otro ejemplo de ROI en una explotación agrícola en Colombia

Para ilustrar el Retorno de Inversión (ROI) en la Agricultura de precisión (AP) de manera más concreta y contextualizada, consideremos un ejemplo práctico hipotético en una explotación agrícola ubicada en Colombia. Supongamos una finca de 100 hectáreas dedicada al cultivo de maíz tecnificado en la región del Valle del Cauca, que toma la decisión estratégica de implementar un paquete inicial de tecnologías de AP.

1. Inversión inicial en tecnología de AP

La inversión en tecnología de AP puede variar, pero un paquete básico y efectivo podría incluir:

- Sistema de guía GPS con piloto automático para un tractor: Este equipo, que permite una alta precisión en las pasadas del tractor, puede costar aproximadamente $60.000.000 COP.

- Monitor de rendimiento: Un dispositivo que se instala en la cosechadora para mapear el rendimiento del cultivo en tiempo real. Su costo estimado es de $20.000.000 COP.

- Software de gestión de datos y creación de mapas de prescripción: Generalmente, se adquiere mediante una suscripción anual. Para el primer año, estimamos $5.000.000 COP.

- Capacitación del personal: Es fundamental que el operario y el agrónomo de la finca entiendan cómo usar la tecnología. Un costo estimado de $3.000.000 COP.

Costo total de la inversión inicial (Año 1):

$60.000.000 (GPS) + $20.000.000 (Monitor) + $5.000.000 (Software) + $3.000.000 (Capacitación) = $88.000.000 COP

2. Beneficios anuales estimados por la implementación de AP

Los beneficios de la AP se traducen en ahorros significativos y un aumento en la productividad. Consideremos los siguientes valores por hectárea para el maíz en Colombia:

- Costo promedio de fertilizantes por hectárea: $1.200.000 COP.
- Costo promedio de agroquímicos por hectárea: $400.000 COP.
- Costo promedio de combustible y maquinaria por hectárea: $300.000 COP.
- Rendimiento promedio de maíz por hectárea: 8 toneladas.
- Precio de venta promedio del maíz por tonelada: $1.200.000 COP.

Ahora, calculemos los ahorros y ganancias por la implementación de la AP:

- Ahorro en Fertilizantes: Se estima un ahorro del 10% debido a la aplicación variable y precisa.
  - Ahorro por hectárea: $1.200.000 COP/ha * 0.10 = $120.000 COP/ha.
  - Ahorro total para 100 ha: $120.000 COP/ha * 100 ha = $12.000.000 COP.
- Ahorro en Agroquímicos: Se proyecta un ahorro del 15% por aplicación localizada y reducción de solapamientos.
  - Ahorro por hectárea: $400.000 COP/ha * 0.15 = $60.000 COP/ha.
  - Ahorro total para 100 ha: $60.000 COP/ha * 100 ha = $6.000.000 COP.

- Ahorro en Combustible y Desgaste de Maquinaria: La eficiencia operativa y la reducción de pasadas pueden generar un ahorro del 10%.
    - Ahorro por hectárea: $300.000 COP/ha * 0.10 = $30.000 COP/ha.
    - Ahorro total para 100 ha: $30.000 COP/ha * 100 ha = $3.000.000 COP.
- Aumento de Rendimiento: La optimización de insumos y el manejo preciso pueden incrementar el rendimiento en un 5%.
    - Incremento por hectárea: 8 ton/ha * 0.05 = 0.4 ton/ha.
    - Valor del incremento por hectárea: 0.4 ton/ha * $1.200.000 COP/ton = $480.000 COP/ha.
    - Valor total del incremento para 100 ha: $480.000 COP/ha * 100 ha = $48.000.000 COP.

Beneficios Anuales Totales Generados por la AP:

$12.000.000 (Fertilizantes) + $6.000.000 (Agroquímicos) + $3.000.000 (Combustible) + $48.000.000 (Rendimiento) = $69.000.000 COP

3.2 Cálculo del retorno de inversión (ROI)

Ahora aplicamos la fórmula del ROI:

$$ROI = \frac{Beneficio\ neto\ de\ la\ inversión - Costo\ de\ la\ inversión}{Costo\ de\ la\ inversión}\ x\ 100\%$$

En nuestro ejemplo:

- Beneficio neto de la inversión (Año 1): $69.000.000 COP
- Costo de la inversión inicial (Año 1): $88.000.000 COP

$$ROI = \frac{\$69.000.000 - \$88.000.000}{\$88.000.000} \; x \; 100\%$$

ROI≈−21.59%

El resultado negativo en el primer año no significa que la inversión sea mala. Es muy común en inversiones de capital que el ROI sea negativo o bajo en el primer año debido a la amortización de la inversión inicial. El verdadero valor de la AP se ve en los años subsiguientes.

3.3 Plazo de recuperación de la inversión (Payback Period):

Este indicador nos muestra cuántos años tardaremos en recuperar la inversión inicial.

- Inversión inicial: $88.000.000 COP
- Beneficio anual recurrente (sin incluir la inversión inicial del primer año): $69.000.000 COP

Años para recuperar la inversión:
$88.000.000 / $69.000.000 ≈ 1.28 años

Este cálculo indica que, bajo la premisa de que los beneficios anuales se mantendrán constantes a partir del segundo año, la inversión inicial en Agricultura de precisión se recuperaría en aproximadamente un año y poco más de tres meses. Esto significa que, a partir del segundo año completo de operación, los beneficios anuales de $69.000.000 COP se transformarían en ganancias netas para la explotación, asumiendo que los costos operativos asociados a la tecnología (como la suscripción de software y los mantenimientos menores) se mantengan estables y previsibles.

Este análisis detallado del Payback Period demuestra de manera categórica que, aunque la inversión inicial en tecnologías de Agricultura de precisión puede percibirse como significativa, el Retorno de Inversión (ROI) es intrínsecamente favorable y se materializa en un plazo de tiempo relativamente corto a mediano y largo plazo. En menos de un año y medio de operación, la inversión en tecnología se habrá amortizado completamente, y a partir de ese momento, generará ganancias netas considerables y recurrentes para la explotación agrícola año tras año. Esta optimización continua de la producción se acompaña de una reducción sustancial del impacto ambiental, lo que subraya el doble beneficio de esta transformación. Este tipo de análisis económico resalta que la implementación de la Agricultura de precisión no debe ser considerada como un lujo tecnológico, sino como una estrategia financiera inteligente y una necesidad operativa para la agricultura moderna en Colombia, orientada a maximizar la eficiencia y la sostenibilidad.

4. Factores clave que influyen en el ROI de la AP

El retorno de inversión (ROI) de la agricultura de precisión (AP) no es una métrica estática; por el contrario, está influenciada por una constelación de factores interrelacionados que pueden potenciar o mitigar su rentabilidad. Comprender estos elementos es fundamental para una planificación estratégica y para maximizar el beneficio económico de la inversión, como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. *Factores clave que influyen en el ROI de la Agricultura de precisión (AP)*

Factor	Descripción técnica	Impacto en el ROI	Implicaciones estratégicas para el productor
Tamaño de la explotación	A mayor superficie, los costos fijos (hardware, software, capacitación) se diluyen por unidad de área. En explotaciones pequeñas y medianas, la rentabilidad depende de la adecuada adaptación tecnológica.	📈 Mayor escala → ROI proporcionalmente más alto por economías de escala. 📈 Pequeñas explotaciones → ROI viable si la tecnología es dimensionada correctamente.	Implementar soluciones modulares y escalables. Evaluar costo/ha y punto de equilibrio antes de invertir.
Tipo de cultivo	Cultivos de alto valor (frutales, hortalizas) o de alto consumo de insumos (maíz, algodón, soja) presentan mayor potencial de ahorro y aumento de rendimiento.	📈 Cultivos intensivos → Recuperación más rápida de la inversión. 📈 Cultivos extensivos de bajo margen → ROI más lento.	Priorizar AP en cultivos con alta variabilidad espacial y alto costo por hectárea. Realizar análisis marginal por cultivo.
Nivel de adopción de la AP	Puede ser incremental (modular) o integral (implementación completa).	📈 Adopción completa → Potencial ROI mayor, pero mayor riesgo. 📈 Adopción gradual → ROI progresivo y menor riesgo financiero.	Diseñar plan de implementación por fases (GPS → mapas de rendimiento → VRT → IA predictiva).

Factor	Descripción técnica	Impacto en el ROI	Implicaciones estratégicas para el productor
Manejo agronómico y capacidad de gestión de datos	Capacidad para interpretar mapas de rendimiento, imágenes multiespectrales y análisis de suelo. La tecnología depende del conocimiento del usuario.	📈 Alta capacidad técnica → Maximiza beneficios económicos. 📈 Baja capacitación → Subutilización tecnológica y bajo ROI.	Invertir en capacitación continua y asesoría en agronomía digital. Implementar protocolos de análisis de datos.
Precios de insumos y productos agrícolas	Volatilidad de fertilizantes, agroquímicos y precios de mercado agrícola.	📈 Altos costos de insumos → Mayor impacto positivo de la optimización. 📈 Bajos precios de venta → Reduce margen y alarga recuperación.	Implementar AP como estrategia de gestión de riesgo y eficiencia productiva.
Disponibilidad de servicios y soporte técnico	Acceso a proveedores confiables y asistencia técnica especializada.	📈 Buen soporte → Implementación eficiente y máximo rendimiento tecnológico. 📈 Falta de soporte → Fallas, subutilización y retraso en ROI.	Seleccionar proveedores con respaldo técnico local y contratos de mantenimiento.

Fuente: modificado de Brigham & Houston, (2017); Wang et al., (2017); Muñoz et al., (2019); Smith & Jones, (2020); Adams & Baker, (2020); Johnson et al., (2022); Díaz & López, (2023).

5. Desafíos y consideraciones económicas

A pesar de los claros y demostrables beneficios económicos que ofrece la agricultura de precisión, su implementación no está exenta de desafíos económicos y operativos que deben ser cuidadosamente considerados y gestionados:

- Inversión inicial significativa: Aunque se ha validado su rentabilidad a largo plazo, la magnitud de la inversión inicial puede constituir una barrera económica sustancial para un segmento de productores agrícolas, particularmente aquellos que operan con limitaciones de capital o que tienen un acceso restringido a líneas de crédito (Smith & Jones, 2020).

- Curva de aprendizaje y adaptación: La adopción de tecnologías de AP requiere una inversión considerable de tiempo y esfuerzo en la capacitación del personal existente y en la adaptación a nuevas metodologías de trabajo y gestión. Esto implica un periodo de transición que debe ser gestionado eficazmente para evitar mermas en la productividad inicial (Muñoz et al., 2019).

- Integración y análisis de datos complejos: La gestión, procesamiento y análisis de los volúmenes masivos de datos generados por diversas fuentes (sensores, maquinaria, satélites) puede ser una tarea compleja. Requiere no solo herramientas de software sofisticadas, sino también habilidades analíticas específicas para extraer información accionable (Chen et al., 2022).

- Disponibilidad de conectividad robusta: En numerosas zonas rurales, la carencia de una infraestructura de conectividad a internet robusta y fiable puede dificultar seriamente la transferencia de grandes volúmenes de datos en tiempo real y el uso eficiente de plataformas de gestión basadas en la nube, limitando así el potencial de la AP (García & Rodríguez, 2018).

- Costos ocultos o recurrentes: Es fundamental considerar, además de la inversión inicial, los costos recurrentes de mantenimiento de los equipos, las suscripciones anuales a licencias de software y las posibles actualizaciones tecnológicas futuras. Estos costos, si no se planifican, pueden afectar la rentabilidad a largo plazo (Adams & Baker, 2020).

6. Estrategias para maximizar el ROI en la AP

Para asegurar un retorno de inversión robusto y sostenible en la implementación de la Agricultura de precisión, los agricultores pueden adoptar diversas estrategias proactivas y bien fundamentadas:

- Análisis costo-beneficio detallado y específico: Antes de comprometerse con una inversión en AP, es imperativo realizar un estudio exhaustivo y riguroso de los costos proyectados y los beneficios esperados, adaptado de forma precisa a las particularidades de la operación agrícola en cuestión. Este análisis debe considerar variables como el tamaño de la explotación, el tipo de cultivo principal y las condiciones agronómicas y climáticas locales (Brigham & Houston, 2017).

- Enfoque modular y progresivo en la adopción tecnológica: No es una condición necesaria adoptar la totalidad de las tecnologías de Agricultura de precisión de manera simultánea. Una estrategia más prudente y financieramente manejable consiste en comenzar con la implementación de una o dos soluciones específicas que ofrezcan el mayor potencial de ahorro o de aumento de rendimiento (por ejemplo, sistemas de guía GPS y monitoreo de rendimiento), para luego expandir gradualmente la integración de otras tecnologías a medida que se consolida la experiencia y se demuestran los beneficios (Silva & Costa, 2020).

- Investigación y acceso a fuentes de financiamiento y subsidios: Es crucial investigar activamente las opciones de financiamiento especializadas que están disponibles para la tecnología agrícola. Adicionalmente, se deben explorar los programas de subsidios o incentivos gubernamentales diseñados para fomentar la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes, los cuales pueden reducir significativamente la barrera de inversión inicial (Vega & Rojas, 2021).

- Inversión en capacitación y asesoramiento especializado: La inversión en la capacitación continua del personal operativo y la búsqueda de asesoramiento por parte de expertos con experiencia comprobada en Agricultura de precisión son acciones fundamentales. Esto optimiza el uso eficaz de la tecnología y asegura una interpretación correcta de los datos generados, lo cual es vital para la toma de decisiones informadas (Johnson et al., 2022).

- Monitoreo continuo y evaluación del rendimiento: Es esencial establecer un sistema para evaluar constantemente los resultados obtenidos y el Retorno de Inversión. Este monitoreo continuo permite ajustar las estrategias de manejo y optimizar de manera proactiva el uso de las herramientas de AP, asegurando que la tecnología se adapte dinámicamente a las condiciones cambiantes del campo y del mercado (Brown & Davis, 2019).

- Priorización de la integración de datos: Se deben buscar activamente soluciones tecnológicas que faciliten la integración de datos provenientes de diferentes fuentes y plataformas. Una visión completa y unificada del campo, facilitada por la interoperabilidad de datos, es crucial para extraer el máximo valor de la información y para una toma de decisiones holística (Chen et al., 2022).

- Implementación de programas de mantenimiento preventivo: Asegurar el mantenimiento adecuado y regular de los equipos de Agricultura de precisión es una estrategia clave para prolongar su vida útil operativa, minimizar el riesgo de fallas costosas y asegurar la disponibilidad constante de la tecnología cuando más se necesita (Miller & White, 2021).

La agricultura de precisión se configura como una inversión estratégica de carácter fundamental para la rentabilidad sostenida y la sostenibilidad a largo plazo de la actividad agrícola global. Si bien la magnitud de la inversión inicial en tecnologías de vanguardia puede ser percibida como considerable por parte de los productores, un análisis económico riguroso, complementado por la evidencia empírica derivada de la experiencia de campo en diversas latitudes, demuestra consistentemente un retorno de inversión (ROI) positivo y, en numerosos casos, una recuperación de capital sorprendentemente rápida (Adams & Baker, 2020). Al optimizar de forma metódica el uso de insumos agrícolas (tales como fertilizantes, agua y agroquímicos), al potenciar significativamente los rendimientos por unidad de superficie cultivada y al mejorar de manera integral la eficiencia operativa de todas las fases del ciclo productivo, la Agricultura de precisión no solo maximiza los beneficios económicos directos para el productor, sino que también contribuye de forma intrínseca a la conformación de un sistema agrícola intrínsecamente más eficiente en el uso de los recursos. En este contexto, la capacidad de comprender a cabalidad y cuantificar de manera precisa el Retorno de Inversión se erige como un paso metodológico y pragmático fundamental para que los agricultores puedan tomar decisiones informadas y, de este modo, aprovechar al máximo el vasto potencial transformador que la Agricultura de precisión ofrece para redefinir el futuro de la producción de alimentos.

A lo largo de la presente exposición, hemos procedido a desglosar el intrincado tejido económico inherente a la Agricultura de precisión (AP), revelando que su alcance trasciende en gran medida la mera concepción de una actualización tecnológica puntual. Por el contrario, se manifiesta como

una inversión estratégica de carácter fundacional, cuya implementación tiene la capacidad de reconfigurar los cimientos mismos de la rentabilidad y la sostenibilidad en el sector agrícola moderno. La percepción inicial de una barrera de entrada elevada, asociada a la inversión significativa en tecnología de precisión, es rápidamente desvanecida y refutada por un análisis robusto de los beneficios tangibles que se materializan a mediano y largo plazo.

Hemos demostrado, a través de la evidencia y los ejemplos expuestos, que la agricultura de precisión no solo optimiza de manera crítica el uso de insumos vitales para la producción agrícola, tales como fertilizantes, agua y agroquímicos, lo que consecuentemente genera ahorros económicos sustanciales y directos para el productor. De forma paralela y sinérgica, la AP impulsa un incremento significativo en los rendimientos por hectárea, un efecto que se logra al adaptar de manera precisa y diferenciada el manejo agronómico a la variabilidad inherente y espacialmente explícita de cada micro-parcela dentro del campo. Esta doble vía de acción, que comprende la reducción de costos operativos y la maximización simultánea de la productividad, se traduce en un Retorno de Inversión (ROI) notablemente positivo. Como ha quedado evidenciado en nuestro ejemplo práctico, que utiliza cifras contextualizadas a la realidad colombiana, esta aproximación puede significar la recuperación de la inversión inicial en un período sorprendentemente corto, a menudo inferior a dos campañas agrícolas completas. Este plazo acelerado de amortización subraya la eficiencia económica de la adopción de estas tecnologías.

Más allá de la cuantificación de los fríos indicadores financieros, la adopción estratégica de la Agricultura de precisión confiere una ventaja competitiva de carácter crucial en un mercado agrícola que se caracteriza por una creciente exigencia y una competitividad acentuada. La capacidad inherente para tomar decisiones agronómicas basadas en datos precisos y disponibles en tiempo real no solo redunda en una mejora tangible de la eficiencia operativa y en una disminución del tiempo efectivo invertido en las labores de campo, sino que también fomenta una gestión más informada,

proactiva y predictiva de los cultivos. Esta optimización intrínseca de los procesos agrícolas también conlleva beneficios invaluables en términos de sostenibilidad ambiental, al minimizar el desperdicio de recursos naturales y al reducir de manera significativa la huella ecológica asociada a la producción agrícola. Este último aspecto es un factor que está siendo progresivamente más valorado por los consumidores globales y por los mercados internacionales, que demandan cada vez más productos con credenciales de sostenibilidad.

En última instancia, la agricultura de precisión (AP) representa una transición paradigmática: de un enfoque agrícola tradicional, que se basaba predominantemente en promedios y aplicaciones uniformes a través de extensas áreas, a una gestión inteligente, personalizada y adaptativa del campo de cultivo. Para los agricultores que se encuentran inmersos en un entorno caracterizado por la fluctuación constante de los costos de producción y por la necesidad imperante de alcanzar niveles máximos de eficiencia, la AP no debe ser conceptualizada como un lujo tecnológico o una opción adicional, sino como una herramienta indispensable y de valor crítico para asegurar la viabilidad económica y la resiliencia operativa de sus explotaciones frente a la complejidad y los desafíos inherentes al siglo XXI. Invertir en Agricultura de precisión es, por consiguiente, una inversión directa en un futuro donde la actividad agrícola no solo alcanzará mayores niveles de rentabilidad económica, sino que también se consolidará como una práctica intrínsecamente más responsable, sostenible y, crucialmente, capaz de alimentar a una población global en constante crecimiento con una utilización optimizada de los recursos disponibles.

Sistesis final

La evaluación de la Agricultura de precisión (AP) no puede limitarse a su sofisticación tecnológica ni a la modernización operativa que introduce en el sistema productivo; su verdadera consolidación depende de su capacidad para generar valor económico sostenible en el tiempo. En este sentido, la AP representa una transformación estructural del modelo financiero agrícola,

al desplazar el paradigma tradicional basado en el aumento progresivo de insumos hacia un enfoque de optimización técnica sustentada en información, modelación y toma de decisiones basada en datos. La inversión en sensores, plataformas digitales, sistemas de aplicación variable, drones, software analítico e inteligencia artificial no constituye un costo aislado, sino una reconfiguración estratégica del capital productivo orientada a mejorar eficiencia marginal, reducir incertidumbre y estabilizar flujos de ingreso.

Desde el punto de vista financiero, la adopción de AP modifica simultáneamente la función de producción y la estructura de costos. Por un lado, incrementa la productividad física al reducir limitantes nutricionales, hídricas y fitosanitarias mediante intervenciones espaciales diferenciadas; por otro, disminuye costos variables al evitar sobredosificación de insumos y pérdidas asociadas a manejo uniforme en ambientes heterogéneos. Esta doble incidencia mayor ingreso bruto y menor costo operativo explica la aceleración en el retorno de inversión observada en múltiples sistemas productivos tecnificados. Indicadores como el Retorno de Inversión (ROI), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación permiten cuantificar con rigurosidad la conveniencia económica de estas tecnologías, evidenciando que, bajo condiciones adecuadas de escala y correcta implementación, los proyectos de AP presentan rentabilidades competitivas frente a alternativas tradicionales de intensificación.

Un elemento central que distingue la AP de otras inversiones agrícolas es su impacto sobre el riesgo. La variabilidad climática, la heterogeneidad edáfica y la volatilidad de precios constituyen fuentes permanentes de incertidumbre económica. La Agricultura de precisión reduce este riesgo al mejorar la capacidad predictiva y la estabilidad interanual del rendimiento, generando flujos de caja más consistentes y disminuyendo la probabilidad de pérdidas severas en años adversos. Esta estabilización del ingreso, aunque difícil de capturar en análisis estáticos, incrementa el valor económico

del sistema al reducir la exposición financiera del productor y mejorar su perfil crediticio y capacidad de planificación a largo plazo.

Asimismo, la escalabilidad tecnológica y las economías de escala digital potencian la rentabilidad en áreas mayores, donde el costo por hectárea disminuye progresivamente al distribuir la inversión fija sobre superficies más amplias. Sin embargo, incluso en explotaciones medianas, la correcta integración de herramientas digitales puede generar ventajas competitivas sustanciales cuando se articula con capacitación técnica y gestión financiera rigurosa. El análisis de sensibilidad se convierte en una herramienta clave para evaluar escenarios optimistas, moderados y pesimistas, permitiendo anticipar el comportamiento del proyecto ante fluctuaciones en precios internacionales, tasas de interés o condiciones climáticas extremas.

En síntesis, la Agricultura de precisión debe comprenderse como una inversión estratégica de mediano y largo plazo que incrementa la eficiencia técnica, fortalece la resiliencia económica y mejora la competitividad estructural del sistema productivo. No se trata simplemente de incorporar tecnología, sino de transformar la lógica económica de la finca hacia un modelo basado en información, optimización y reducción sistemática de ineficiencias. Cuando la innovación tecnológica se integra con análisis financiero sólido y planificación estratégica, la AP deja de ser una alternativa experimental y se consolida como un modelo económico robusto, capaz de sostener rentabilidad en contextos de alta variabilidad climática, presión sobre costos de insumos y creciente exigencia de mercados globales. En este marco, la Agricultura de precisión no solo moderniza la producción; redefine la sostenibilidad financiera del sector agropecuario en el siglo XXI.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1. Estudio de caso comparativo de ROI

Selecciona dos países o regiones con características agrícolas contrastantes (por ejemplo, una región con agricultura extensiva y baja tecnificación vs. otra con agricultura intensiva y alta tecnificación). Investiga los costos promedio de insumos (fertilizantes, agua, agroquímicos), el precio de los cultivos principales y el valor de la maquinaria de AP en cada una de esas regiones.

Tarea:

- Calcula un ROI hipotético para la implementación de un paquete básico de AP (GPS, monitor de rendimiento, software) en una explotación de 200 hectáreas para un cultivo representativo en cada una de las regiones.
- Analiza las diferencias en el ROI y el período de recuperación.
- Discute los factores socioeconómicos y estructurales que podrían explicar estas diferencias.

Ejercicio 2. Diseño de una estrategia de adopción modular de AP

Eres un asesor agrícola. Un pequeño grupo de agricultores de una región semiárida (por ejemplo, Castilla-La Mancha en España, o el sur de California en EE. UU.) te consulta sobre cómo empezar con la Agricultura de precisión, dado que tienen limitaciones de capital.

Tarea:

- Propón una estrategia de adopción modular de AP en 3 fases (ej. Fase 1: Guía GPS, Fase 2: Mapeo de rendimiento y análisis de suelo, Fase 3: Riego de precisión y aplicación variable de insumos).

- Para cada fase, identifica la tecnología clave a incorporar, los costos estimados y los beneficios económicos esperados.

- Justifica por qué esta secuencia modular podría ser más viable económicamente para ellos que una adopción "completa" de una sola vez.

Ejercicio 3. El Valor de los datos: ¿Cómo monetizar la información de AP?

La Agricultura de precisión genera una inmensa cantidad de datos (mapas de rendimiento, sensores de suelo, imágenes satelitales, etc.). Sin embargo, la interpretación y el uso efectivo de estos datos a menudo son un desafío para los agricultores.

Tarea:

- Discute cómo un agricultor podría monetizar la información generada por sus sistemas de AP, más allá de la optimización interna.

- Identifica al menos tres modelos de negocio o servicios adicionales que podrían surgir de la gestión y análisis de datos de AP (ej. servicios de asesoría, venta de datos anonimizados, plataformas de intercambio de información).

- Analiza los desafíos éticos y de privacidad asociados con la monetización de datos agrícolas.

Ejercicio 4. Evaluación de riesgos y mitigación financiera en AP

Toda inversión conlleva riesgos. En el caso de la AP, estos pueden incluir fallas tecnológicas, falta de capacitación del personal, o cambios en los precios de los commodities.

Tarea:

- Identifica al menos cinco riesgos financieros significativos asociados con la implementación de la AP.
- Para cada riesgo, propone una estrategia de mitigación específica (ej. seguros agrícolas, contratos de servicio y mantenimiento con proveedores, planes de contingencia).
- Debate cómo la capacidad de la AP para reducir el riesgo agronómico (ej. identificar problemas temprano) puede compensar el riesgo financiero de la inversión inicial.

Ejercicio 5. Análisis del impacto de subsidios y financiamiento en el ROI de AP

Muchos gobiernos e instituciones ofrecen subsidios o líneas de crédito preferenciales para la adopción de tecnologías sostenibles como la AP.

Tarea:

- Investiga un programa de subsidios o financiamiento para la AP en un país de tu elección (ej. la Política Agrícola Común (PAC) en la UE, programas del USDA en EE. UU., incentivos en Brasil o India).
- Considerando el ejemplo de ROI del capítulo (o uno propio), recalcula el ROI y el período de recuperación incluyendo el impacto de este subsidio o financiamiento.
- Discute críticamente si estos programas son suficientemente efectivos para acelerar la adopción de la AP, y qué mejoras se podrían implementar.

Ejercicio 6. Desafíos económicos para la AP en países en desarrollo

La brecha tecnológica entre países desarrollados y en desarrollo es un obstáculo para la adopción global de la AP.

Tarea:

- Identifica y discute los tres principales desafíos económicos que enfrentan los agricultores en países en desarrollo para implementar la Agricultura de precisión.
- Propón soluciones innovadoras o adaptaciones de la AP que podrían hacerla más accesible y rentable en estos contextos (ej. tecnologías de bajo costo, modelos de servicio compartido, enfoques basados en la comunidad).
- Analiza el papel de las organizaciones internacionales y las ONG en la promoción económica de la AP en estas regiones.

Ejercicio 7. El ROI "Invisible": beneficios no monetarios de la AP

Además de los beneficios económicos directos, la AP ofrece ventajas que no siempre se cuantifican fácilmente en términos monetarios, pero que son cruciales para la sostenibilidad a largo plazo.

Tarea:

- Identifica y describe al menos cuatro beneficios no monetarios de la Agricultura de precisión (ej. mejora de la salud del suelo, reducción del impacto ambiental, mejora de la calidad de vida del agricultor, resiliencia ante el cambio climático).
- Discute cómo estos "ROI invisibles" podrían ser presentados y valorados en un análisis de inversión para persuadir a un agricultor sobre los beneficios integrales de la AP.

- Argumenta si, a largo plazo, estos beneficios no monetarios podrían ser tan o más importantes que los puramente económicos para la adopción generalizada de la AP.

Referencias

Adams, S., & Baker, L. (2020). Economic drivers of precision agriculture adoption: A review. *Journal of Agricultural Economics,* 71(2), 345–360.

Brigham, E. F., & Houston, J. F. (2017). *Fundamentos de administración financiera* (14.ª ed.). Cengage Learning.

Brown, T., & Davis, R. (2019). Soil health and productivity improvements through precision farming techniques. *Soil Science Society of America Journal,* 84(1), 123–135.

Chen, L., Wu, J., & Li, Q. (2022). Optimizing pesticide application in precision agriculture using AI-driven spatial data analysis. *Agricultural Systems,* 198, 103387.

Díaz, M., & López, F. (2023). Efficiency gains and fuel consumption reduction in precision agriculture operations. *Precision Agriculture,* 24(1), 201–215.

García, A., & Rodríguez, S. (2018). Water savings in precision irrigation systems for arid and semi-arid regions. *Journal of Hydrology,* 567, 1–10.

Johnson, K., Green, P., & Hall, R. (2022). Data analytics and decision support systems in smart farming: A review. *Computers and Electronics in Agriculture,* 193, 106727.

Miller, D., & White, J. (2021). Impact of GPS-guided machinery on operational efficiency and labor costs in large-scale farming. *Biosystems Engineering,* 204, 1–10.

Muñoz, L., Vargas, R., & Castro, E. (2019). Adopción de la agricultura de precisión en pequeñas y medianas explotaciones agrícolas: Barreras y oportunidades. *Revista de Ciencias Agronómicas,* 36(1), 45–58.

Robertson, M. J., Llewellyn, R. S., Mandel, R., Lawes, R., Bramley, R. G. V., Swift, L., Metz, N., & O'Callaghan, C. (2012). Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: Status, issues and prospects. *Precision Agriculture,* 13, 181–199. https://doi.org/10.1007/s11119-011-9236-3

Silva, P., & Costa, R. (2020). Variable rate seeding: Optimizing plant density for heterogeneous soil conditions. *Crop Science,* 60(4), 1987–1999.

Smith, J., & Jones, A. (2020). The economics of precision agriculture: A comprehensive review of costs and benefits. *Agricultural Economics,* 51(5), 651–667.

Vega, M., & Rojas, D. (2021). Sustainability and traceability in food supply chains: The role of precision agriculture. *Food Policy,* 102, 102027.

Wang, X., Li, Y., & Zhang, J. (2017). Impact of precision agriculture technologies on crop yield and profitability: A meta-analysis. *Agronomy Journal,* 109(6), 2548–2559.

Capítulo 5

Educación y formación en agricultura de precisión: desafíos y oportunidades.



Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

1. Comprender la importancia estratégica de la formación en Agricultura de precisión (AP).
2. Identificar brechas de conocimiento técnico en el sector agropecuario.
3. Diseñar estrategias pedagógicas para la enseñanza de tecnologías 4.0 aplicadas al agro.
4. Analizar los desafíos institucionales, sociales y económicos en la adopción tecnológica.
5. Integrar enfoques interdisciplinarios en programas académicos agrícolas.
6. Evaluar oportunidades de innovación educativa en contextos rurales.

Conceptos clave

- Educación 4.0 aplicada al agro: Es el modelo educativo que integra tecnologías digitales avanzadas como inteligencia artificial, análisis de datos, simuladores virtuales, plataformas en la nube y aprendizaje híbrido en la formación de profesionales del sector agropecuario. En el contexto agrícola, implica enseñar al estudiante a interactuar con sistemas digitales, interpretar información geoespacial, analizar datos productivos y tomar decisiones basadas en evidencia cuantitativa.
- Competencias digitales agrícolas: Conjunto de habilidades técnicas y cognitivas necesarias para manejar herramientas digitales en

sistemas productivos agrícolas. Incluyen manejo SIG, interpretación de imágenes satelitales y multiespectrales, análisis estadístico de datos agronómicos, uso de plataformas IoT, comprensión de modelos predictivos y evaluación económica de tecnologías.

- Alfabetización tecnológica rural: Proceso formativo mediante el cual productores, técnicos y estudiantes rurales adquieren conocimientos básicos para comprender y utilizar tecnologías digitales aplicadas al agro. Incluye el uso de dispositivos móviles, plataformas de monitoreo agrícola, aplicaciones de gestión productiva y comprensión elemental de datos generados por sensores.

- Aprendizaje basado en datos: Metodología educativa en la cual la formación técnica se fundamenta en el análisis de datos reales provenientes de sistemas productivos. En Agricultura de precisión, implica trabajar con bases de datos de rendimiento, mapas de variabilidad, registros climáticos y análisis de suelo para desarrollar competencias analíticas aplicadas.

- Formación interdisciplinaria: Enfoque educativo que integra conocimientos de agronomía, estadística, informática, economía agrícola, ingeniería y ciencias ambientales para abordar la complejidad de los sistemas productivos modernos. La Agricultura de precisión requiere profesionales capaces de articular múltiples disciplinas en la toma de decisiones.

- Capacitación técnica continua: Proceso permanente de actualización profesional orientado a mantener vigentes las competencias tecnológicas frente a la rápida evolución de herramientas digitales y modelos predictivos. En el agro, implica formación constante en nuevas plataformas, sensores, software y metodologías de análisis.

- Transferencia de tecnología: Proceso mediante el cual el conocimiento generado en universidades, centros de investigación o

empresas tecnológicas es adaptado y aplicado por productores y técnicos en campo. En Agricultura de precisión, incluye capacitación, asistencia técnica, validación en finca y seguimiento de resultados productivos.

- Brecha digital rural: Diferencia en acceso, conectividad, infraestructura tecnológica y capacidades digitales entre zonas urbanas y rurales o entre productores de diferentes escalas. Esta brecha limita la adopción equitativa de tecnologías de Agricultura de precisión y constituye un desafío estructural para el desarrollo agrícola sostenible.

- Ecosistemas de innovación agrícola: Conjunto articulado de actores —universidades, empresas tecnológicas, productores, entidades gubernamentales y centros de investigación— que interactúan para desarrollar, validar y escalar soluciones tecnológicas aplicadas al agro. Estos ecosistemas facilitan la adopción de Agricultura de precisión mediante cooperación y flujo de conocimiento.

- Extensión agropecuaria digital: Evolución de la extensión tradicional basada en visitas presenciales hacia un modelo que utiliza plataformas digitales, aplicaciones móviles, monitoreo remoto y capacitación virtual para transferir conocimiento técnico a productores. Permite mayor cobertura, reducción de costos y seguimiento continuo.

- Microcredenciales tecnológicas: Certificaciones académicas de corta duración orientadas a desarrollar competencias específicas en herramientas digitales o tecnologías agrícolas avanzadas. En Agricultura de precisión, pueden enfocarse en SIG agrícola, manejo de drones, análisis de datos productivos o modelación agroclimática.

- Simulación y laboratorios virtuales: Entornos digitales que permiten recrear escenarios productivos y experimentar con varia-

bles agrícolas sin intervenir físicamente el sistema real. En la formación en Agricultura de precisión, los simuladores permiten practicar programación de riego, análisis de variabilidad espacial y evaluación económica de decisiones tecnológicas.

Desarrollo teorico

Educación y formación en agricultura de precisión: desafíos y oportunidades

La agricultura de precisión (AP) ha superado ampliamente su concepción inicial como una promesa tecnológica de carácter futurista para consolidarse como una realidad operativa que está transformando de manera profunda el sistema productivo agrícola a escala global. Basada en la observación sistemática, la medición rigurosa y la intervención diferenciada sobre la variabilidad espacial y temporal inherente a los cultivos y a las propiedades del suelo, la AP se ha posicionado como un componente clave para optimizar el uso de insumos, incrementar la eficiencia productiva y promover modelos de producción agrícola más sostenibles y económicamente viables. No obstante, la implementación efectiva de esta transformación tecnológica no depende exclusivamente del acceso a herramientas avanzadas como sistemas de posicionamiento global (GPS/GNSS), sensores de campo SIG, plataformas de teledetección o maquinaria agrícola con capacidad de aplicación variable. Su éxito está condicionado, en mayor medida, por la disponibilidad de capital humano altamente capacitado.

Sin profesionales capaces de comprender e integrar los principios agronómicos fundamentales con las herramientas digitales emergentes, el potencial transformador de la agricultura de precisión tiende a permanecer subutilizado. La tecnología, por sí sola, no garantiza mejoras productivas ni sostenibilidad; es el conocimiento aplicado, la interpretación adecuada de los datos y la toma de decisiones informadas lo que convierte la información en valor agronómico y económico real. En este sentido, la educación y la

formación especializada se constituyen como pilares estratégicos para la adopción efectiva y sostenible de la agricultura de precisión.

Este capítulo se orienta a profundizar en el papel de la educación y la formación en agricultura de precisión como elementos esenciales para su consolidación a largo plazo. Se aborda la complejidad inherente a su carácter multidisciplinario, que integra conocimientos de agronomía, edafología, agro climatología, estadística, tecnologías de la información, análisis de datos y automatización. Asimismo, se analizan los desafíos que enfrentan tanto las instituciones educativas como los profesionales del sector para mantenerse actualizados frente a la rápida evolución tecnológica y la creciente demanda de nuevas competencias.

Entre los principales retos se encuentran la persistente brecha entre los contenidos académicos tradicionales y las necesidades reales del sector productivo, la limitada disponibilidad de infraestructura tecnológica adecuada para la enseñanza práctica, y la necesidad de formar docentes con competencias técnicas y pedagógicas alineadas con la agricultura digital. A ello se suma la velocidad con la que emergen nuevas herramientas, plataformas y metodologías, lo que exige procesos de actualización continua y flexible.

Paralelamente, este escenario plantea oportunidades significativas para la innovación educativa. La actualización de los planes de estudio, el fortalecimiento de la colaboración entre universidades, centros de investigación y empresas del sector agroindustrial, y la adopción de metodologías pedagógicas activas como el aprendizaje basado en proyectos, el uso de datos reales de campo, las prácticas con tecnologías digitales y la integración de plataformas virtuales permiten formar profesionales con un perfil más acorde a las demandas actuales y futuras del agro. Estas estrategias contribuyen a empoderar a una nueva generación de ingenieros, agrónomos y técnicos capaces de interpretar datos complejos, gestionar sistemas productivos digitalizados y liderar procesos de innovación en el sector rural.

En última instancia, la formación especializada en agricultura de precisión no solo constituye un factor determinante para el avance tecnológico y la competitividad del sector agrícola, sino que también es un componente esencial para enfrentar desafíos globales como la seguridad alimentaria, la adaptación al cambio climático y la sostenibilidad ambiental. Invertir en educación y capacitación en agricultura de precisión equivale a sentar las bases para una agricultura más inteligente, eficiente y resiliente, capaz de responder de manera efectiva a las exigencias de un mundo en constante transformación.

1. Fundamentos de la agricultura de precisión y su relevancia educativa

La agricultura de precisión (AP) es considerablemente más que una simple colección de tecnologías; representa, en esencia, un enfoque estratégico integral y un paradigma transformador en la gestión de la producción agrícola. Este paradigma se fundamenta en la premisa de que la variabilidad espacial y temporal presente dentro de un campo cultivado no solo debe ser reconocida, sino también gestionada de manera diferenciada y optimizada (National Research Council, 1997). Este enfoque contrasta de forma marcada con los sistemas agrícolas tradicionales, los cuales suelen aplicar insumos de manera uniforme sobre grandes extensiones de terreno, ignorando las heterogeneidades inherentes del suelo y las condiciones específicas del cultivo.

El objetivo central de la agricultura de precisión es optimizar la asignación de recursos clave como agua, nutrientes, pesticidas y semillas mediante la aplicación del principio operativo de suministrar la cantidad correcta, en el lugar correcto y en el momento correcto (Godfray et al., 2010). Esta lógica de manejo se traduce directamente en un incremento de la eficiencia productiva, una reducción sustancial de los costos de producción y una disminución significativa del impacto ambiental asociado a las actividades agrícolas.

Para alcanzar estos objetivos, la agricultura de precisión integra de manera sinérgica principios agronómicos fundamentales con tecnologías avanzadas de la información y la comunicación, conocimientos de ingeniería y metodologías propias de la ciencia de datos (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). En este contexto, los componentes estructurales de la AP que deben constituir la base de cualquier programa educativo especializado incluyen los siguientes mostrados en la tabla 1:

Tabla 1. *Componentes tecnológicos fundamentales en Agricultura de precisión*

Componente	Descripción técnica	Función dentro del sistema de AP	Beneficios productivos	Competencias formativas requeridas
Sistemas de Posicionamiento Global (GPS/GNSS)	Sistemas de georreferenciación satelital que permiten ubicar con alta precisión puntos dentro del campo. Base de la agricultura de precisión.	Georreferenciación de datos de suelo y rendimiento. Guiado automático de maquinaria. Registro espacial de operaciones agrícolas.	✓ Reducción de solapamientos ✓ Evita omisiones de área ✓ Optimiza combustible, tiempo e insumos ✓ Mejora precisión operativa	Comprensión de principios GNSS, fuentes de error (multipath, dilución de precisión, correcciones RTK), configuración de sistemas de guiado y aplicaciones prácticas en campo.
Sensores remotos	Sensores instalados en satélites o drones (multiespectrales, térmicos, hiperespectrales, LiDAR) que capturan información sin contacto directo.	Monitoreo del estado fisiológico del cultivo, biomasa, humedad del suelo y detección de estrés biótico/abiótico.	✓ Evaluación casi en tiempo real ✓ Cobertura de grandes áreas ✓ Identificación temprana de problemas	Interpretación de imágenes, selección de índices (NDVI, NDRE, SAVI), procesamiento digital y calibración radiométrica.
Sensores proximales	Dispositivos que miden propiedades del suelo o cultivo a corta distancia (pH, CE, materia orgánica, vigor vegetal).	Diagnóstico detallado y específico por sitio.	✓ Alta precisión puntual ✓ Base para zonificación de manejo	Procedimientos de muestreo, calibración de sensores y validación de datos.

Componente	Descripción técnica	Función dentro del sistema de AP	Beneficios productivos	Competencias formativas requeridas
SIG	Plataformas para almacenar, gestionar, analizar y visualizar datos georreferenciados.	Integración de capas de información (rendimiento, suelo, topografía, imágenes) y generación de mapas de prescripción.	✓ Identificación de patrones espaciales ✓ Delimitación de zonas homogéneas ✓ Soporte a decisiones basadas en datos	Manejo de software SIG, análisis espacial, interpolación, generación de mapas temáticos y prescripciones VRT.
Software de gestión y análisis de datos	Plataformas de telemetría, análisis estadístico y modelos predictivos basados en big data y aprendizaje automático.	Procesamiento, análisis e interpretación de grandes volúmenes de datos agrícolas.	✓ Toma de decisiones informada ✓ Predicción de rendimiento y riesgos ✓ Optimización de insumos	Fundamentos de ciencia de datos agrícola, análisis estadístico, modelos predictivos y manejo de plataformas digitales.
Maquinaria con tecnología de aplicación variable (VRT)	Equipos agrícolas (sembradoras, fertilizadoras, pulverizadoras) capaces de ajustar automáticamente la dosis de insumos en tiempo real según mapas de prescripción.	Ejecución precisa de decisiones agronómicas basadas en datos.	✓ Optimización de fertilización y siembra ✓ Reducción de desperdicios ✓ Mejora en eficiencia y sostenibilidad	Calibración de equipos, integración con GPS/SIG, interpretación de mapas de prescripción y mantenimiento técnico.

Fuente: Modificado de Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, (2004); Gebbers & Adamchuk, (2010); Zhang et al., (2012); Mulla, (2013).

La relevancia educativa de estos fundamentos es amplia y estratégica. La formación en agricultura de precisión debe ofrecer una base técnica sólida en cada uno de estos componentes, pero, de manera aún más importante, debe fomentar una comprensión profunda de los procesos agronómicos subyacentes. Un profesional en agricultura de precisión no es únicamente un operador de tecnologías digitales, sino un especialista con visión estratégica que emplea estas herramientas para interpretar procesos biológicos y edáficos complejos, diagnosticar problemas de manera temprana y optimizar la gestión integral de los cultivos (Liu et al., 2016).

Esto exige un enfoque educativo inherentemente multidisciplinario que articule conocimientos de agronomía, ingeniería agrícola, ciencias de la computación, estadística aplicada, ciencia de datos y economía agraria. Solo mediante esta integración será posible formar profesionales capaces de interpretar información compleja, tomar decisiones basadas en evidencia y aplicar soluciones de agricultura de precisión de manera eficaz para enfrentar los desafíos productivos, económicos y ambientales de la agricultura del siglo XXI.

2. Desafíos en la educación y formación en agricultura de precisión

La adopción sostenida y el desarrollo continuo de la agricultura de precisión (AP) dependen de manera crítica de la disponibilidad y el acceso a un capital humano adecuadamente capacitado y especializado. No obstante, el ámbito de la educación y la formación en esta disciplina enfrenta una serie de desafíos complejos y multifacéticos, derivados principalmente de su carácter innovador, del ritmo acelerado de los avances tecnológicos y de su naturaleza intrínsecamente interdisciplinaria. Superar estos desafíos resulta fundamental para garantizar que el sector agrícola pueda aprovechar de forma plena, eficiente y sostenible los beneficios transformadores que ofrece la agricultura de precisión.

2.1. Brecha entre la academia y la industria

Uno de los desafíos más críticos y recurrentemente señalados en la educación y formación en agricultura de precisión es la persistente brecha existente entre los programas académicos y las demandas reales del sector productivo agrícola (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Aunque las universidades y los centros de formación técnica han avanzado en la incorporación de contenidos relacionados con la AP en sus planes de estudio, con frecuencia se evidencia una desconexión sustancial entre el conocimiento teórico impartido en el aula y las habilidades prácticas, operativas y tecnológicas que la industria requiere de sus profesionales.

Esta brecha se manifiesta de diversas maneras que afectan directamente la preparación de los egresados. En muchos casos, los estudiantes adquieren una base conceptual sólida sobre principios clave de la agricultura de precisión, como el funcionamiento de los SIG, los fundamentos de los sensores remotos o la lógica de la aplicación variable de insumos. Sin embargo, suelen carecer de experiencia práctica suficiente en el manejo directo de las tecnologías, equipos y plataformas de software que se utilizan de forma cotidiana en el sector productivo (Gebbers & Adamchuk, 2010). Por ejemplo, un estudiante puede comprender teóricamente la generación de mapas de rendimiento, pero no haber participado activamente en la calibración de un monitor de rendimiento en una cosechadora, en la gestión de grandes volúmenes de datos reales, o en la resolución de problemas técnicos imprevistos durante las labores de campo.

La rápida evolución tecnológica que caracteriza a la agricultura de precisión profundiza aún más esta desconexión. Las instituciones educativas, cuyos procesos de actualización curricular suelen ser lentos y condicionados por estructuras administrativas rígidas, enfrentan serias dificultades para mantenerse alineadas con la velocidad a la que emergen nuevas tecnologías, algoritmos, plataformas digitales y metodologías de análisis (Liaghat & Balasundram, 2010). Como consecuencia, los egresados pueden haber sido formados en herramientas que, al momento de su inserción laboral, ya han

sido parcialmente superadas o reemplazadas en la industria, generando una obsolescencia temprana de sus competencias técnicas (Srinivasan, 2006). Ante esta situación, las empresas se ven obligadas a invertir recursos adicionales en procesos de capacitación interna para nivelar las habilidades del personal recién contratado, lo que implica costos económicos y retrasos en la plena incorporación productiva de estos profesionales.

Más allá de las competencias técnicas específicas, la industria agrícola contemporánea demanda de manera creciente habilidades transversales o blandas, tales como la capacidad de resolver problemas en contextos reales y complejos, el pensamiento crítico aplicado a sistemas productivos heterogéneos y la comunicación efectiva con agricultores, técnicos, asesores, proveedores y otros actores del sistema agro productivo (Paisley, 2015). Sin embargo, estas competencias suelen recibir una atención limitada en programas educativos excesivamente centrados en aspectos técnicos o tecnológicos. Como resultado, los empleadores reportan que un número significativo de aspirantes a cargos vinculados con la agricultura de precisión presenta debilidades en estas áreas, lo que restringe su capacidad de adaptación, liderazgo y toma de decisiones en un sector dinámico y altamente cambiante (Oeth, 2019).

La reducción efectiva de esta brecha requiere una articulación más estrecha, sistemática y estratégica entre la academia y la industria agrícola (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Dicha articulación puede concretarse a través de diversas acciones complementarias:

- Pasantías y prácticas profesionales obligatorias: Estas experiencias permiten a los estudiantes integrarse en entornos laborales reales, aplicar conocimientos teóricos en situaciones concretas y familiarizarse con tecnologías, flujos de trabajo y problemáticas propias del sector productivo.

- Proyectos de investigación conjuntos: La colaboración entre universidades y empresas en proyectos orientados a resolver

problemáticas reales del sector favorece la transferencia de conocimiento, la innovación aplicada y la formación de profesionales con experiencia en investigación y desarrollo tecnológico.

- Participación de expertos del sector productivo en el diseño curricular: La inclusión activa de profesionales con experiencia en agricultura de precisión en la formulación y actualización de los planes de estudio contribuye a asegurar la pertinencia, actualidad y relevancia de los contenidos formativos.

- Donación de equipos y licencias de software: El aporte de maquinaria, sensores y plataformas digitales por parte de la industria a las instituciones educativas facilita el acceso de los estudiantes a herramientas de uso real y fortalece la formación práctica (Maresma et al., 2020).

- Desarrollo de programas de formación continua: La creación conjunta de programas de actualización y capacitación permanente resulta clave para atender las necesidades tanto de estudiantes como de profesionales en ejercicio, permitiendo la adaptación constante a nuevas tecnologías y enfoques metodológicos.

Abordar de manera integral la brecha entre la academia y la industria no solo mejora la empleabilidad y el desempeño profesional de los egresados en agricultura de precisión, sino que también acelera la adopción efectiva y la optimización sostenida de estas tecnologías en el sector agrícola. En última instancia, esta articulación fortalece la competitividad, la innovación y la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas productivos agrícolas.

2.2. Rápida evolución tecnológica

Uno de los desafíos más dinámicos y persistentemente complejos que enfrenta la educación y la formación en agricultura de precisión (AP) es la velocidad y magnitud de la evolución tecnológica que caracteriza a este campo. La AP es, por definición, una disciplina altamente innovadora,

marcada por la incorporación continua de nuevas herramientas, sistemas de hardware y software, algoritmos avanzados y metodologías operativas que emergen a un ritmo sin precedentes (Liaghat & Balasundram, 2010). Esta acelerada dinámica tecnológica plantea retos significativos para los programas educativos, los docentes responsables de su implementación y los estudiantes que buscan formarse en esta área, afectando directamente la pertinencia, vigencia y efectividad de los procesos formativos.

La constante aparición y diversificación de tecnologías de adquisición de datos constituye un ejemplo representativo de esta problemática. Si bien los sensores satelitales han sido históricamente un pilar fundamental en la obtención de información a escala regional, el crecimiento exponencial del uso de sistemas aéreos no tripulados, equipados con cámaras multiespectrales, térmicas o sensores LiDAR, ha transformado radicalmente la capacidad de capturar datos de alta resolución espacial y temporal en los sistemas agrícolas (Mulla, 2013). En este contexto, la formación en agricultura de precisión debe abarcar no solo los principios teóricos de funcionamiento de estas tecnologías, sino también competencias prácticas relacionadas con su operación segura, la planificación de vuelos, el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos y la interpretación rigurosa de los resultados. Mantener actualizados los laboratorios académicos con este tipo de hardware y software representa, además, un desafío financiero y logístico considerable para muchas instituciones educativas (Maresma et al., 2020).

De manera paralela, las plataformas de software y los sistemas de análisis de datos agrícolas experimentan una evolución constante y acelerada. Los sistemas de gestión de información agrícola, SIG y las plataformas basadas en la nube incorporan de forma continua nuevas funcionalidades, algoritmos de inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje automático orientadas al procesamiento y análisis del big data agrícola (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). En este escenario, los programas de formación no pueden limitarse a la enseñanza instrumental de herramientas específicas, ya que estas pueden quedar obsoletas en periodos cortos. Resulta

indispensable, por tanto, que la educación en AP priorice el desarrollo de competencias analíticas, pensamiento crítico y capacidad de adaptación, permitiendo que los estudiantes comprendan los principios conceptuales subyacentes y transfieran sus conocimientos a nuevas plataformas y entornos tecnológicos conforme estos evolucionan.

La rápida evolución tecnológica también impone una presión significativa sobre los docentes y formadores. Para ofrecer una enseñanza pertinente y actualizada, los instructores deben mantenerse en constante proceso de actualización profesional, lo cual implica la participación en congresos especializados, talleres técnicos, programas de formación avanzada y, en muchos casos, estancias de investigación o vinculación directa con el sector productivo (Srinivasan, 2006). Sin un respaldo institucional sólido que facilite el acceso a estas oportunidades de actualización, existe un alto riesgo de que los contenidos impartidos pierdan vigencia, afectando negativamente la calidad del proceso educativo.

Adicionalmente, la integración formal de nuevas tecnologías en los planes de estudio suele verse limitada por estructuras académicas rígidas y procedimientos administrativos complejos. Los procesos de revisión, aprobación y ajuste curricular pueden extenderse durante varios años, lo que provoca que los contenidos programáticos queden desactualizados incluso antes de su implementación completa (Gebbers & Adamchuk, 2010). Frente a este desafío, resulta necesario que las instituciones educativas adopten modelos curriculares más flexibles y modulares, que permitan la incorporación ágil de cursos electivos, seminarios especializados, talleres prácticos o módulos temáticos centrados en las tendencias tecnológicas emergentes y los avances más recientes en agricultura de precisión.

En síntesis, la rápida evolución tecnológica en la agricultura de precisión constituye un desafío permanente que exige flexibilidad institucional, inversión sostenida en infraestructura y capacitación, y un compromiso constante con la actualización académica. Sin una respuesta estratégica y proactiva por parte de las instituciones educativas, la formación en AP

corre el riesgo de no preparar adecuadamente a los futuros profesionales para desenvolverse con solvencia en un sector agrícola que se transforma de manera acelerada y continua.

2.3. Necesidad de un enfoque multidisciplinario

La agricultura de precisión (AP) se distingue de manera fundamental de las prácticas agrícolas tradicionales por su naturaleza intrínsecamente interdisciplinaria. No constituye una disciplina aislada, sino el resultado de una integración compleja y sinérgica de conocimientos, metodologías y herramientas provenientes de múltiples áreas del saber (Liu et al., 2016). Esta característica representa, simultáneamente, su mayor fortaleza como motor de innovación y uno de los desafíos más significativos para los sistemas de educación y formación, ya que exige la adopción de un enfoque multidisciplinario que con frecuencia entra en tensión con las estructuras académicas tradicionales, organizadas en departamentos y especialidades rígidas.

La implementación efectiva y el dominio técnico de la agricultura de precisión requieren la articulación coherente de competencias y saberes procedentes de campos diversos, entre los cuales se destacan los siguientes (ver tabla 2):

Tabla 2. *Disciplinas y competencias fundamentales en Agricultura de precisión*

Disciplina	Aporte conceptual y técnico	Aplicación en Agricultura de precisión	Competencias profesionales requeridas	Impacto estratégico
Agronomía	Fundamentos biológicos del crecimiento vegetal, fenología, fisiología, nutrición mineral, interacciones suelo–planta–ambiente y manejo fitosanitario.	Interpretación agronómica de mapas de rendimiento, índices de vegetación, análisis de suelo y monitoreo de estrés.	Diagnóstico agronómico basado en datos, formulación de recomendaciones de fertilización y manejo diferenciado.	Garantiza que la tecnología responda a necesidades fisiológicas reales del cultivo.
Ingeniería agrícola y mecánica	Diseño, operación y mantenimiento de maquinaria agrícola, automatización, robótica y sistemas de control.	Implementación de VRT, sistemas de guiado GPS/GNSS, drones y maquinaria autónoma.	Calibración de equipos, integración de sistemas, electrónica aplicada y mantenimiento preventivo.	Asegura precisión operativa y confiabilidad tecnológica en campo.
Informática y ciencia de datos	Programación, bases de datos, análisis espacial, aprendizaje automático e inteligencia artificial.	Procesamiento de big data agrícola, modelación predictiva y optimización de decisiones.	Manejo de SIG avanzado, análisis estadístico computacional, diseño de modelos predictivos.	Convierte datos en conocimiento accionable.

Disciplina	Aporte conceptual y técnico	Aplicación en Agricultura de precisión	Competencias profesionales requeridas	Impacto estratégico
Estadística y geoestadística	Análisis de variabilidad espacial y temporal, interpolación, validación de modelos y estimación de incertidumbre.	Delimitación de zonas de manejo, interpretación de mapas y evaluación de confiabilidad de datos.	Aplicación de kriging, análisis de correlación espacial, diseño experimental georreferenciado.	Sustenta científicamente la toma de decisiones basada en datos espaciales.
Economía agraria y gestión empresarial	Evaluación financiera, análisis costo-beneficio, optimización de recursos y planificación estratégica.	Cálculo de ROI, VAN, TIR y análisis de riesgo en inversiones tecnológicas.	Gestión financiera agropecuaria, evaluación de inversiones y planeación estratégica.	Garantiza sostenibilidad económica del sistema tecnificado.
Ciencias ambientales y sostenibilidad	Evaluación de impacto ambiental, eficiencia en uso de recursos y mitigación de huella ecológica.	Optimización del uso de agua, fertilizantes y agroquímicos; reducción de emisiones y lixiviación.	Análisis ambiental, gestión sostenible y cumplimiento normativo.	Alinea la productividad con sostenibilidad y aceptación social.

Fuente: Esta Investigación

El principal desafío educativo radica, por tanto, en cómo integrar de manera efectiva estos dominios del conocimiento, que históricamente han operado de forma independiente, dentro de un currículo coherente, funcional y verdaderamente sinérgico. Las estructuras universitarias tradicionales, organizadas en facultades y departamentos altamente especializados, tienden a generar una formación fragmentada, en la que los estudiantes reciben contenidos disciplinares aislados sin una integración clara. Esta fragmentación limita su capacidad para sintetizar conocimientos y aplicarlos de manera integral a problemas agrícolas reales, caracterizados por su complejidad y multidimensionalidad.

Para superar este desafío estructural, las instituciones educativas deben promover activamente la colaboración interdepartamental en el diseño, implementación y evaluación de los programas académicos en agricultura de precisión. Esto puede materializarse mediante la creación de programas conjuntos, especializaciones transversales o itinerarios formativos interdisciplinarios, así como a través de metodologías de aprendizaje basadas en problemas y proyectos, que exijan de forma natural la integración de conocimientos agronómicos, tecnológicos, estadísticos y económicos. La adopción de un enfoque pedagógico transdisciplinario, centrado en la resolución de problemas complejos del mundo real, es clave para formar profesionales capaces de interpretar sistemas agrícolas de manera holística.

En este sentido, la necesidad de un enfoque multidisciplinario en la educación en agricultura de precisión no constituye una opción deseable, sino un imperativo ineludible. Solo mediante esta integración será posible formar una nueva generación de profesionales capaces de comprender el sistema agrícola en su totalidad, utilizar la tecnología de manera crítica y estratégica, y tomar decisiones informadas que sean productivamente eficientes, ambientalmente sostenibles y económicamente viables frente a los desafíos de la agricultura contemporánea.

2.4. Costo y acceso a equipos y software de vanguardia

La agricultura de precisión (AP) es, por su propia naturaleza, una disciplina intensiva en tecnología. En consecuencia, tanto su implementación práctica en el sector productivo como su enseñanza efectiva en el ámbito académico dependen en gran medida de la disponibilidad y el acceso a equipos especializados y software de última generación. No obstante, el elevado costo asociado a la adquisición, el mantenimiento y la actualización constante de estas herramientas constituye uno de los desafíos más persistentes y limitantes para las instituciones educativas y los programas de formación. Esta restricción financiera incide de manera directa en la capacidad de ofrecer experiencias de aprendizaje prácticas, inmersivas y alineadas con las exigencias tecnológicas actuales de la industria agrícola.

La infraestructura tecnológica requerida para una formación sólida y pertinente en agricultura de precisión es considerable y comprende múltiples componentes de alto costo, entre los que se incluyen los siguientes:

- Sistemas de posicionamiento global (GPS/GNSS) de alta precisión: Los receptores GNSS de grado topográfico, equipados con capacidades RTK (Real-Time Kinematic) o PPK (Post-Processed Kinematic), son fundamentales para la georreferenciación precisa de datos de campo y para el guiado automatizado de la maquinaria agrícola con exactitud centimétrica o milimétrica. Debido a su complejidad técnica y precisión, estos sistemas representan una inversión inicial elevada para la mayoría de las instituciones educativas (Gebbers & Adamchuk, 2010).

- Sensores avanzados de monitoreo agrícola: Este grupo incluye drones de uso profesional equipados con cámaras multiespectrales, hiperespectrales o térmicas, así como sensores de CEa del suelo, medidores de clorofila, sensores ambientales y dispositivos para el monitoreo fisiológico de los cultivos. La adquisición de estos equipos, junto con sus sistemas de control y mantenimien-

to, implica costos significativos que limitan su disponibilidad en entornos académicos (Mulla, 2013).

- Maquinaria agrícola con tecnología de aplicación variable (VRT): La disponibilidad de sembradoras, fertilizadoras y pulverizadoras con capacidad de tasa variable es esencial para la enseñanza práctica de los principios de manejo diferenciado. Sin embargo, el costo de este tipo de maquinaria es sustancialmente superior al de los equipos convencionales, lo que dificulta su incorporación en laboratorios o estaciones experimentales universitarias.

- Licencias de software especializado: El uso de plataformas de SIG, software para el procesamiento de imágenes obtenidas por drones, sistemas de gestión de fincas y herramientas avanzadas de análisis estadístico y modelación requiere licencias comerciales que pueden ser anuales o perpetuas. Estos costos recurrentes, especialmente cuando se necesitan múltiples licencias para uso académico, representan una carga económica considerable para las instituciones (Zhang et al., 2012).

- Infraestructura de computación de alto rendimiento: El procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos geoespaciales y de sensores demanda estaciones de trabajo avanzadas, servidores de almacenamiento y capacidad de cómputo elevada. Estos requerimientos incrementan de forma significativa los costos asociados a la infraestructura tecnológica necesaria para la formación en AP (Liu et al., 2016).

El impacto acumulativo de estos costos resulta particularmente crítico para instituciones educativas con presupuestos limitados, una situación común en países en desarrollo o en regiones donde la inversión en educación agrícola y tecnológica no constituye una prioridad estratégica. En estos contextos, la imposibilidad de adquirir y actualizar periódicamente equipos y software de vanguardia conduce a una formación predominantemente

teórica, en la que los estudiantes adquieren conocimientos conceptuales, pero carecen de la experiencia práctica indispensable para operar, calibrar y resolver problemas asociados a las tecnologías empleadas actualmente en el sector productivo (Maresma et al., 2020). Esta situación profundiza la brecha entre la academia y la industria y limita la empleabilidad y el desempeño profesional de los egresados.

A lo anterior se suma el costo recurrente del mantenimiento, la calibración y la actualización de los equipos, así como la rápida obsolescencia tecnológica que caracteriza a la agricultura de precisión (Liaghat & Balasundram, 2010). En muchos casos, los equipos adquiridos pueden quedar desactualizados en pocos años, lo que obliga a realizar nuevas inversiones para mantener la pertinencia y vigencia de los programas formativos.

Frente a este escenario, es posible implementar diversas estrategias orientadas a mitigar las limitaciones económicas y ampliar el acceso a tecnologías de vanguardia en el ámbito educativo:

- Alianzas estratégicas con la industria: La colaboración con empresas de tecnología agrícola, fabricantes de maquinaria y productores tecnológicamente avanzados puede facilitar la donación de equipos funcionales, el acceso a licencias educativas de software o la realización de prácticas académicas en instalaciones productivas reales (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

- Uso de simuladores y entornos virtuales de aprendizaje: Los simuladores de maquinaria agrícola y los entornos virtuales para el análisis de datos permiten desarrollar habilidades operativas y analíticas en condiciones controladas y a menor costo. Aunque no sustituyen completamente la experiencia de campo, constituyen una alternativa pedagógica valiosa.

- Aprovechamiento de software de código abierto y recursos gratuitos: Herramientas como SIG para análisis geoespacial,

junto con lenguajes de programación como R y Python y sus librerías especializadas, ofrecen un alto potencial formativo con costos mínimos, contribuyendo a la democratización del acceso a tecnologías analíticas avanzadas.

- Creación de consorcios y redes educativas: La cooperación interinstitucional mediante consorcios regionales o nacionales permitiría compartir infraestructura tecnológica costosa y establecer laboratorios especializados de agricultura de precisión accesibles a múltiples programas académicos.

- Gestión de financiamiento externo y fondos de investigación: La participación activa en convocatorias de financiamiento gubernamental y programas de investigación orientados al fortalecimiento de la educación agrícola puede aliviar significativamente las restricciones presupuestales de las instituciones (National Research Council, 1997).

En síntesis, el alto costo y el acceso limitado a equipos y software de vanguardia constituyen una de las principales barreras para el desarrollo de una educación sólida y pertinente en agricultura de precisión. Superar este desafío requiere una gestión institucional creativa, una colaboración estratégica y sostenida con la industria y un compromiso firme por parte de los gobiernos y las universidades para invertir en infraestructura tecnológica. Solo de esta manera será posible garantizar que las futuras generaciones de profesionales agrícolas cuenten con las competencias técnicas y prácticas necesarias para liderar la transformación digital del sector agrícola en el siglo XXI.

2.5. Capacitación insuficiente de instructores

Un desafío crítico y frecuentemente subestimado en la educación y la formación en agricultura de precisión (AP) es la capacitación insuficiente y la falta de actualización sistemática del cuerpo docente y de los instructores.

A pesar de la creciente demanda de profesionales especializados en AP por parte del sector productivo, es común que los docentes universitarios y técnicos responsables de impartir esta formación no cuenten con la experiencia práctica ni con el dominio actualizado de las tecnologías digitales que sustentan esta disciplina (Srinivasan, 2006). Esta limitación tiene un impacto directo sobre la calidad del proceso formativo y, en consecuencia, sobre el nivel de preparación de los egresados para enfrentar los retos reales del sector agrícola moderno.

Una proporción significativa del personal académico involucrado en la enseñanza de la AP proviene de una sólida formación en agronomía tradicional, ciencias del suelo convencionales o ingeniería agrícola clásica. Aunque estos conocimientos constituyen una base esencial e insustituible, en muchos casos no están acompañados de una especialización profunda en las tecnologías digitales, analíticas y automatizadas que caracterizan a la agricultura de precisión contemporánea. Entre las competencias técnicas que con mayor frecuencia presentan vacíos formativos se encuentran las siguientes:

- Manejo avanzado de SIG (SIG): Más allá del uso básico de estas herramientas, la enseñanza efectiva de la AP requiere dominio en análisis espacial avanzado, geoestadística aplicada, modelación espacial y personalización de flujos de trabajo orientados a la toma de decisiones agronómicas (Zhang et al., 2012).

- Procesamiento y análisis de datos de sensores remotos: La interpretación agronómica rigurosa de imágenes obtenidas por satélites y drones, incluyendo datos multiespectrales, térmicos o LiDAR, exige habilidades especializadas en calibración radiométrica, generación de índices de vegetación, análisis multitemporal y validación en campo (Mulla, 2013).

- Operación y calibración de maquinaria de agricultura de precisión: La enseñanza de habilidades prácticas requiere experiencia directa

con monitores de rendimiento, sistemas de guiado automático basados en GPS/GNSS RTK y equipos de aplicación variable. Sin esta experiencia operativa, la formación tiende a limitarse a una comprensión teórica insuficiente para el contexto productivo real.

- Ciencia de datos y Big data agrícola: La AP moderna demanda competencias en recopilación, limpieza, gestión y análisis de grandes volúmenes de datos, así como el uso de herramientas estadísticas avanzadas, lenguajes de programación como R o Python y fundamentos de aprendizaje automático aplicados a sistemas agrícolas complejos (Liu et al., 2016).

La rápida evolución tecnológica que caracteriza a la agricultura de precisión intensifica aún más este problema. La constante aparición de nuevas plataformas, sensores, algoritmos y soluciones digitales implica que los conocimientos adquiridos por los instructores pueden volverse obsoletos en un período relativamente corto si no existe un compromiso institucional sólido con la formación continua (Liaghat & Balasundram, 2010). Sin embargo, muchas universidades y centros de formación enfrentan restricciones presupuestarias, limitaciones de tiempo y cargas académicas elevadas que dificultan la participación regular del profesorado en procesos de actualización técnica, pasantías industriales o programas de especialización avanzada (ver figura 1).

Figura 1. *Modelo Integrado de Competencias Avanzadas en Agricultura de precisión*



Fuente: esta investigación.

Como consecuencia directa, los estudiantes suelen recibir una formación predominantemente conceptual, con escasas oportunidades para desarrollar competencias prácticas y operativas en contextos reales. Esta situación perpetúa la brecha entre la academia y la industria, ya que los empleadores reportan que los egresados, aun cuando poseen una base teórica sólida, requieren procesos adicionales y costosos de capacitación práctica una vez incorporados al mercado laboral (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Asimismo, la limitada experiencia práctica de los instructores restringe la implementación de metodologías pedagógicas activas, como el aprendizaje basado en proyectos, el análisis de casos reales o la resolución de problemas en campo, fundamentales para el desarrollo de competencias aplicadas.

Para superar este desafío estructural y fortalecer la calidad de la educación en agricultura de precisión, resulta indispensable la adopción de estrategias institucionales proactivas y coordinadas, entre las que se destacan las siguientes:

- Programas sistemáticos de desarrollo profesional continuo: Las instituciones deben invertir de manera sostenida en la formación técnica de sus instructores mediante cursos especializados, diplomados, certificaciones y estancias en centros de investigación o empresas líderes en tecnologías de AP.

- Vinculación estructural con la industria: Facilitar pasantías técnicas, estancias sabáticas o proyectos conjuntos con empresas del sector permite a los instructores adquirir experiencia práctica directa y actualizar sus conocimientos conforme a las necesidades reales del entorno productivo (Gebbers & Adamchuk, 2010).

- Creación de redes académicas y comunidades de práctica: El intercambio de experiencias, recursos didácticos y buenas prácticas entre docentes de distintas instituciones y regiones favorece la actualización colectiva y la innovación pedagógica en AP.

- Incentivos institucionales a la actualización docente: Reconocer formalmente el esfuerzo de los instructores que se capacitan, innovan en sus metodologías y actualizan contenidos curriculares contribuye a fortalecer una cultura académica orientada a la excelencia y la mejora continua.

- Incorporación de profesionales del sector productivo como docentes invitados: La participación de expertos con experiencia práctica en agricultura de precisión enriquece la formación, aporta una visión aplicada y conecta a los estudiantes con las demandas reales del mercado laboral.

En síntesis, la capacitación insuficiente de los instructores constituye una de las barreras más relevantes para el fortalecimiento de la educación en agricultura de precisión. Abordar este desafío de manera estratégica es fundamental para garantizar que los programas formativos no solo transmitan conocimiento teórico, sino que desarrollen competencias prácticas, analíticas y críticas en los futuros profesionales. Solo así será posible formar líderes capaces de impulsar la transformación digital, productiva y sostenible del sector agrícola en el contexto del siglo XXI.

2.6. Resistencia al cambio y percepción de complejidad

A pesar de los beneficios demostrados y cuantificables que ofrece la agricultura de precisión (AP) en términos de eficiencia operativa, rentabilidad económica y sostenibilidad ambiental, su adopción generalizada y la participación activa en programas de educación y formación asociados a esta disciplina se ven, con frecuencia, obstaculizadas por la resistencia al cambio y por una marcada percepción de complejidad por parte de un sector de agricultores y profesionales del ámbito agropecuario. Estas barreras de naturaleza psicológica, cultural y social son tan relevantes como los desafíos técnicos o económicos, y deben ser abordadas de manera explícita y estratégica dentro de cualquier iniciativa educativa que busque una adopción efectiva y sostenida de la AP.

La resistencia al cambio constituye una respuesta humana natural frente a la incertidumbre y al riesgo percibido. En el contexto agrícola, muchos productores cuentan con una amplia experiencia basada en prácticas tradicionales transmitidas de generación en generación, las cuales han demostrado ser funcionales bajo determinados contextos productivos. La introducción de nuevas tecnologías, junto con la necesidad de modificar rutinas de manejo profundamente arraigadas, puede generar desconfianza, aversión al riesgo y reticencia a abandonar métodos conocidos en favor de soluciones tecnológicamente novedosas (Schmitz & Hoppe, 2019). Esta resistencia suele ser más pronunciada en agricultores de mayor edad o en explotaciones de pequeña escala, donde los costos iniciales y el esfuerzo de

aprendizaje asociados a la AP pueden percibirse como desproporcionados frente a los beneficios esperados.

De forma complementaria, la percepción de complejidad tecnológica representa un factor disuasorio de gran relevancia. La agricultura de precisión integra múltiples herramientas avanzadas, que incluyen sistemas de posicionamiento global, sensores remotos y proximales, software de análisis geoespacial, plataformas de gestión de datos y maquinaria agrícola automatizada. Para personas con escasa formación técnica o limitada experiencia en el uso de tecnologías digitales, este ecosistema tecnológico puede resultar intimidante y difícil de comprender (Larkin & Lowenberg-DeBoer, 2004). La interpretación de mapas de rendimiento, la gestión de grandes volúmenes de datos o el uso de interfaces digitales complejas pueden generar una sensación de agobio que inhibe la disposición a participar en procesos de capacitación o adopción tecnológica. Si bien muchas de estas herramientas han evolucionado hacia diseños más intuitivos y amigables, la percepción de complejidad persiste y constituye una barrera real para la adopción.

Entre los principales factores que alimentan la resistencia al cambio y la percepción de complejidad se destacan los siguientes:

- Falta de conocimiento fundamental: Un número significativo de agricultores no cuenta con una comprensión básica de los principios de la AP ni de sus beneficios prácticos y medibles. La ausencia de claridad sobre el retorno de la inversión y sobre la capacidad de la tecnología para resolver problemas específicos de la explotación agrícola reduce de manera considerable la motivación para aprender y adoptar estas herramientas (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

- Experiencias negativas previas: Casos aislados de fallos tecnológicos, inversiones que no generaron los resultados esperados o experiencias tempranas con tecnologías inmaduras pueden haber

consolidado percepciones negativas que se transmiten dentro de las comunidades agrícolas, afectando la confianza colectiva en la AP.

- Déficit de confianza en la tecnología y en los datos: La desconfianza en la precisión de los datos generados por sensores o en las recomendaciones derivadas de modelos digitales puede conducir a la inacción. Si los productores no perciben fiabilidad en la información, difícilmente la utilizarán como base para decisiones productivas críticas.

- Insuficiente alfabetización digital: La agricultura de precisión requiere un nivel básico de habilidades digitales que no todos los agricultores poseen, especialmente en contextos rurales con limitado acceso a tecnologías de la información (Godfray et al., 2010). La necesidad de interactuar con computadoras, aplicaciones móviles o software especializado puede convertirse en un factor de exclusión.

- Carencia de soporte técnico cercano y oportuno: La falta de asistencia técnica local, accesible y eficiente incrementa la percepción de riesgo y complejidad. La posibilidad de enfrentar problemas técnicos sin acompañamiento adecuado desalienta la adopción y limita la continuidad en el uso de las tecnologías de AP.

Para enfrentar de manera efectiva la resistencia al cambio y reducir la percepción de complejidad, los programas de educación y formación en agricultura de precisión deben diseñarse desde un enfoque empático, gradual y centrado en las necesidades reales de los usuarios finales. Entre las estrategias más relevantes se encuentran:

- Demostraciones prácticas y difusión de casos de éxito locales: La evidencia empírica observada en condiciones similares a las propias resulta altamente persuasiva. Parcelas demostrativas, días de campo y visitas a explotaciones que ya aplican AP permiten

visualizar los beneficios reales de la tecnología y fortalecen la confianza de los productores (Schmitz & Hoppe, 2019).

- Enfoque en beneficios concretos y simplicidad operativa: La formación debe priorizar la explicación de cómo la AP soluciona problemas específicos, reduce costos o simplifica procesos, evitando una sobrecarga de detalles técnicos innecesarios que puedan reforzar la percepción de complejidad.

- Capacitación modular y progresiva: El diseño de cursos cortos y escalonados facilita la incorporación gradual de conocimientos, permitiendo que los participantes se familiaricen con una tecnología a la vez antes de avanzar hacia sistemas más complejos.

- Tutorías personalizadas y soporte técnico continuo: El acompañamiento cercano durante las etapas iniciales de adopción reduce la incertidumbre, fortalece la confianza y aumenta la probabilidad de éxito en la implementación de la AP.

- Material didáctico accesible y lenguaje claro: El uso de recursos visuales, ejemplos prácticos y un lenguaje sencillo contribuye a democratizar el acceso al conocimiento y a disminuir las barreras cognitivas asociadas a la tecnología.

- Participación de líderes locales y referentes del sector: La implicación de agricultores innovadores y líderes comunitarios como promotores de la AP favorece la aceptación social de la tecnología y acelera su difusión entre pares.

En conjunto, la resistencia al cambio y la percepción de complejidad no deben entenderse como obstáculos insalvables, sino como dimensiones humanas y culturales que requieren ser abordadas de manera consciente y estratégica. Una educación efectiva en agricultura de precisión debe ir más allá de la transferencia de conocimientos técnicos, incorporando elementos de comunicación, confianza y apropiación social de la tecnología.

Solo así será posible promover una adopción sostenida, informada y socialmente legitimada de la AP, contribuyendo a una transformación agrícola verdaderamente inclusiva, eficiente y sostenible.

2.7. Adaptación a diferentes niveles educativos y audiencias

La agricultura de precisión (AP) no constituye una disciplina homogénea que pueda abordarse pedagógicamente mediante un enfoque único y universal. Por el contrario, uno de los desafíos centrales en la educación y formación en AP radica en la necesidad de adaptar de manera diferenciada los contenidos, las metodologías de enseñanza y los materiales didácticos a la diversidad de niveles educativos y perfiles de audiencia existentes en el sector agrícola (Larkin & Lowenberg-DeBoer, 2004). Cada grupo objetivo presenta características particulares en términos de conocimientos previos, necesidades formativas, motivaciones, capacidades técnicas y contextos de aplicación, lo que exige un enfoque pedagógico flexible, contextualizado y cuidadosamente diferenciado para garantizar la efectividad del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Las principales audiencias que demandan formación en agricultura de precisión incluyen, entre otras, las siguientes:

- Agricultores y operadores de maquinaria agrícola: Este grupo requiere una formación eminentemente práctica, orientada a la aplicación directa de las tecnologías en el campo. El énfasis debe centrarse en el uso operativo de los equipos de AP, como monitores de rendimiento, sistemas de guiado automatizado y tecnologías de aplicación variable, así como en la interpretación básica de mapas de campo y la toma de decisiones operativas simples. Para esta audiencia, resulta fundamental demostrar de manera clara los beneficios económicos y productivos derivados de la adopción tecnológica, así como facilitar la resolución de problemas comunes que surgen en la práctica diaria (Schmitz & Hoppe, 2019). Los programas de extensión agrícola, los cursos cortos presenciales,

las capacitaciones en campo y los formatos híbridos se presentan como estrategias particularmente adecuadas para este segmento, dada su necesidad de resultados inmediatos y aplicables.

- Técnicos agrícolas y asesores profesionales: Los técnicos y asesores requieren una formación más profunda y estructurada, que trascienda la simple operación de equipos. Deben desarrollar competencias para interpretar datos complejos, integrar información proveniente de múltiples fuentes, calibrar equipos de precisión, diagnosticar problemas productivos específicos y asesorar a los agricultores en la implementación estratégica de la AP. Asimismo, necesitan herramientas para realizar análisis económicos que permitan evaluar la rentabilidad de las inversiones tecnológicas. En este caso, la formación debe equilibrar una base teórica sólida con una práctica intensiva, incorporando análisis de datos geoespaciales y gestión de proyectos de agricultura digital (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Los diplomados, cursos de especialización y certificaciones profesionales resultan formatos apropiados para este nivel de cualificación.

- Ingenieros agrónomos y científicos agrarios: Para los profesionales con formación universitaria avanzada, la educación en AP debe ser conceptualmente rigurosa y de mayor profundidad analítica. Este grupo debe comprender los modelos agronómicos que explican la variabilidad espacial y temporal de los cultivos y del suelo, los fundamentos estadísticos y geoestadísticos, el funcionamiento detallado de los sensores, así como las metodologías avanzadas de procesamiento e integración de datos geoespaciales. Su rol incluye el diseño de soluciones innovadoras, la evaluación crítica de tecnologías y la generación de nuevo conocimiento aplicado (Liu et al., 2016). Los programas de pregrado, maestría y doctorado constituyen el marco académico idóneo para esta formación integral.

- Investigadores y desarrolladores de tecnología agrícola: Este nivel representa el grado más alto de especialización, enfocado en la investigación científica avanzada y en el desarrollo de nuevas tecnologías para la agricultura. La formación debe centrarse en modelización predictiva, inteligencia artificial, aprendizaje automático, robótica agrícola y desarrollo de software y hardware específicos para aplicaciones de AP (Gebbers & Adamchuk, 2010). Los programas doctorales y los centros de investigación especializados son el entorno formativo más adecuado para este perfil profesional.

El problema recurrente en muchos sistemas educativos es la tendencia a diseñar programas formativos estandarizados que intentan responder simultáneamente a todas estas audiencias. Este enfoque suele resultar ineficiente, ya que genera contenidos excesivamente básicos para algunos grupos y demasiado complejos o poco prácticos para otros, limitando el impacto real del proceso formativo.

Para enfrentar este desafío de manera efectiva, las instituciones educativas y los proveedores de formación deben considerar varias estrategias clave:

- Realización de diagnósticos de necesidades formativas Antes de diseñar programas educativos, es indispensable identificar con precisión el perfil de la audiencia objetivo y sus requerimientos específicos. Esto puede lograrse mediante encuestas, entrevistas, talleres participativos y consultas con actores clave del sector agrícola y de la industria tecnológica.

- Diseño de currículos modulares y flexibles: La estructuración de contenidos en módulos independientes y combinables permite adaptar las rutas de aprendizaje a los objetivos profesionales de cada participante, facilitando una formación progresiva y personalizada (Srinivasan, 2006).

- Implementación de metodologías pedagógicas diferenciadas: El aprendizaje práctico en campo es esencial para agricultores y operadores, mientras que los proyectos de investigación y el análisis de datos complejos son más adecuados para científicos e investigadores. El uso de estudios de caso, simulaciones y aprendizaje basado en problemas puede adaptarse a distintos niveles ajustando la complejidad de los escenarios.

- Desarrollo de materiales didácticos adaptados: Es fundamental contar con recursos educativos diferenciados, como manuales técnicos, guías visuales, videos tutoriales y plataformas de aprendizaje virtual, diseñados según el nivel técnico y el contexto de cada audiencia, utilizando un lenguaje claro y ejemplos relevantes.

- Promoción de la formación continua y el aprendizaje a lo largo de la vida: Dado el carácter dinámico de la AP, es imprescindible ofrecer mecanismos que permitan la actualización permanente de conocimientos y habilidades, garantizando la vigencia profesional en un entorno tecnológico en constante evolución (Liaghat & Balasundram, 2010).

En síntesis, la adaptación de la educación en agricultura de precisión a distintos niveles educativos y perfiles de audiencia no es únicamente una cuestión pedagógica, sino un imperativo estratégico para el desarrollo del sector agrícola. Reconocer esta diversidad y responder a ella de manera proactiva permite garantizar una formación pertinente, accesible y efectiva, capaz de impulsar la adopción tecnológica y maximizar el impacto transformador de la AP en la producción agrícola global.

3. Oportunidades en la educación y formación en agricultura de precisión

A pesar de los desafíos significativos y multifacéticos que enfrenta la educación y la formación en Agricultura de precisión (AP), el desarrollo con-

tinuo de esta disciplina emergente abre una amplia gama de oportunidades para transformar de manera profunda la pedagogía agrícola, fortalecer la innovación en el sector agroalimentario y contribuir de forma sustantiva a la sostenibilidad global. La naturaleza dinámica y tecnológicamente avanzada de la AP, junto con su elevado potencial de impacto productivo, económico y ambiental, crea un escenario propicio para la renovación curricular, la colaboración interinstitucional y la formación de una fuerza laboral agrícola altamente capacitada, resiliente y adaptable a los cambios futuros.

3.1. Desarrollo de programas curriculares innovadores

La naturaleza intrínsecamente multidisciplinaria de la Agricultura de precisión, sumada a la creciente demanda de profesionales cualificados por parte del sector productivo, representa una oportunidad estratégica para el diseño e implementación de programas académicos innovadores, flexibles y alineados con las exigencias del siglo XXI (Gebbers & Adamchuk, 2010). En este contexto, se destacan diversas modalidades de formación:

- Grados universitarios y posgrados especializados: Numerosas instituciones de educación superior han comenzado a desarrollar programas de pregrado y posgrado específicamente orientados a áreas como Agricultura de precisión, Agricultura Digital, Agrotecnología o Ciencia de Datos Agrícolas. Estos programas permiten integrar de manera coherente conocimientos de agronomía, ingeniería, informática, teledetección, estadística y economía agraria, con el objetivo de formar profesionales con una visión sistémica e integral del ecosistema agrícola digital.

- Diplomados y cursos de especialización profesional: Estos programas están dirigidos principalmente a técnicos, asesores y profesionales en ejercicio que buscan actualizar sus competencias o adquirir habilidades específicas altamente demandadas, tales como el manejo de drones para aplicaciones agrícolas, el análisis avanzado de datos geoespaciales o la implementación de tecnologías

de aplicación variable. Su carácter intensivo y focalizado facilita la rápida transferencia de conocimiento y la adopción efectiva de nuevas herramientas en el campo.

- Integración de módulos de AP en programas tradicionales: La incorporación estratégica de módulos o énfasis en Agricultura de precisión dentro de programas existentes de agronomía, ingeniería agrícola o ciencias ambientales permite enriquecer el perfil profesional de los egresados sin requerir una reestructuración completa de los planes de estudio. Esta estrategia favorece la transversalización de la AP y amplía su impacto formativo.

Estos programas curriculares innovadores ofrecen, además, la oportunidad de priorizar enfoques pedagógicos centrados en el aprendizaje basado en proyectos y en la resolución de problemas reales del sector agrícola, preparando a los estudiantes para enfrentar de manera efectiva la complejidad y variabilidad inherentes a los sistemas productivos modernos.

3.2. Fortalecimiento de la colaboración academia–industria

La necesidad de reducir la brecha histórica entre la formación académica y la práctica profesional en Agricultura de precisión constituye una oportunidad clave para fortalecer la colaboración estratégica entre las instituciones educativas y la industria agrícola (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Esta relación sinérgica puede materializarse a través de múltiples mecanismos:

- Pasantías y prácticas profesionales estructuradas: Las empresas del sector pueden ofrecer espacios de formación práctica donde los estudiantes apliquen conocimientos teóricos en contextos reales, se familiaricen con tecnologías de última generación y desarrollen competencias operativas altamente valoradas en el mercado laboral.

- Proyectos conjuntos de investigación, desarrollo e innovación: La ejecución de proyectos colaborativos entre universidades y empresas permite abordar problemáticas reales del sector productivo, generar conocimiento aplicado y promover una transferencia tecnológica bidireccional que beneficia tanto a la academia como a la industria.

- Donación de equipos, licencias y patrocinio de laboratorios: Las empresas de tecnología agrícola pueden contribuir mediante la donación de equipos, el otorgamiento de licencias de software con fines educativos o el financiamiento de laboratorios y centros de demostración, facilitando el acceso a tecnologías de alto costo para estudiantes y docentes (Maresma et al., 2020).

- Participación de la industria en el diseño curricular: La inclusión de expertos del sector productivo en los procesos de diseño y actualización curricular garantiza que los contenidos formativos respondan a las necesidades reales del mercado laboral y anticipen las competencias futuras requeridas.

Este fortalecimiento de la relación academia–industria no solo mejora la empleabilidad y la formación práctica de los estudiantes, sino que también permite a las empresas acceder a talento emergente y a soluciones innovadoras basadas en investigación aplicada.

3.3. Implementación de metodologías pedagógicas activas

La Agricultura de precisión, debido a su carácter aplicado y orientado a la toma de decisiones basada en datos, constituye un entorno particularmente favorable para la adopción de metodologías pedagógicas activas que superan el modelo tradicional de enseñanza centrado en la transmisión pasiva de conocimientos (Mulla, 2013). Entre las principales oportunidades en este ámbito se destacan:

- Aprendizaje basado en proyectos: Los estudiantes pueden desarrollar proyectos reales o simulados utilizando datos de campo auténticos, software especializado y herramientas analíticas para resolver problemáticas concretas, como la optimización de la fertilización, el manejo de la variabilidad espacial del rendimiento o la detección temprana de estrés hídrico. Este enfoque fomenta el pensamiento crítico, la capacidad analítica y el trabajo colaborativo.

- Aprendizaje experiencial en entornos reales: La implementación de granjas escuela o parcelas demostrativas equipadas con tecnologías de AP permite a los estudiantes interactuar directamente con sensores, maquinaria de precisión y sistemas de análisis, favoreciendo una comprensión profunda y contextualizada de los procesos productivos.

- Análisis de casos reales y datos auténticos: El uso de conjuntos de datos reales provenientes de explotaciones agrícolas, tales como mapas de rendimiento históricos, datos edáficos y variables climáticas, brinda a los estudiantes una experiencia práctica en la interpretación de información compleja y en la toma de decisiones fundamentadas en evidencia.

La adopción de estas metodologías activas no solo incrementa el nivel de motivación y participación de los estudiantes, sino que también fortalece el desarrollo de competencias técnicas, analíticas y estratégicas que son esenciales para el desempeño profesional en el ámbito de la Agricultura de precisión.

3.4. Uso de plataformas de aprendizaje digital y simulación

La misma tecnología digital que impulsa la agricultura de precisión constituye, al mismo tiempo, una fuente poderosa de herramientas innovadoras para su enseñanza, capacitación y difusión del conocimiento

(Schmitz & Hoppe, 2019). Este paralelismo entre objeto de estudio y medio pedagógico abre un abanico significativo de oportunidades educativas:

- Cursos en línea masivos y abiertos (MOOCs) y microcredenciales: Estas plataformas permiten ampliar de forma sustancial el alcance geográfico y social de la formación en Agricultura de precisión, ofreciendo acceso a contenidos especializados a una audiencia global y altamente diversa. Resultan especialmente valiosas para agricultores y técnicos ubicados en zonas rurales remotas, donde el acceso a programas de educación formal es limitado. Las microcredenciales, por su parte, ofrecen trayectorias de aprendizaje flexibles, modulares y certificables, orientadas a la adquisición de competencias específicas y de rápida aplicación práctica.

- Simuladores y entornos virtuales de entrenamiento: El uso de software de simulación de maquinaria agrícola, simuladores de vuelo de drones o plataformas virtuales de gestión de fincas permite a los estudiantes practicar habilidades operativas y de toma de decisiones estratégicas en entornos seguros, controlados y de bajo costo. Estas herramientas reducen el riesgo asociado al uso directo de equipos reales y facilitan la repetición de escenarios complejos, fortaleciendo el aprendizaje experiencial previo a la implementación en campo.

- Realidad virtual y realidad aumentada: Las tecnologías de realidad virtual y aumentada emergen como herramientas con un alto potencial pedagógico, al permitir la creación de experiencias de aprendizaje inmersivas e interactivas. Mediante estas tecnologías, los estudiantes pueden explorar virtualmente parcelas agrícolas, interactuar con modelos tridimensionales de maquinaria de Agricultura de precisión y visualizar datos geoespaciales complejos de forma intuitiva y dinámica, mejorando la comprensión espacial y la interpretación de información multivariable.

- Uso estratégico de software de código abierto: La integración activa de herramientas de código abierto, como SIG para el análisis espacial o lenguajes de programación como R y Python junto con librerías especializadas en análisis geoespacial y agrícola, reduce de manera significativa las barreras económicas asociadas a la formación en AP. Este enfoque democratiza el acceso a competencias fundamentales, fomenta la autonomía técnica de los estudiantes y fortalece la reproducibilidad y transparencia en los procesos de análisis de datos.

En conjunto, estas plataformas y herramientas digitales no sustituyen la formación presencial ni la experiencia directa en campo, pero sí la complementan de manera efectiva, aportando flexibilidad temporal, ampliando el acceso al conocimiento especializado y contribuyendo a una educación más inclusiva, escalable y adaptada a los contextos contemporáneos de aprendizaje.

3.5. Fortalecimiento de la alfabetización digital y agrícola

La educación en Agricultura de precisión no se limita a la capacitación en un conjunto específico de tecnologías avanzadas, sino que contribuye de manera sustancial al fortalecimiento de la alfabetización digital general del sector agropecuario (Godfray et al., 2010). A través del uso sistemático de software especializado, la interpretación de datos complejos y la integración de múltiples fuentes de información, los participantes en estos programas desarrollan habilidades transversales altamente transferibles, aplicables más allá del ámbito estrictamente agrícola.

Esta convergencia entre alfabetización digital y conocimiento agronómico genera una forma de "alfabetización doble" que empodera a agricultores, técnicos y profesionales, haciéndolos más adaptables, resilientes y capaces de responder a los cambios tecnológicos acelerados y a las nuevas exigencias del mercado agroalimentario. La capacidad de comprender datos, evaluar información crítica y tomar decisiones fundamentadas se

convierte, así, en un activo estratégico para el desarrollo rural y la competitividad del sector.

Las oportunidades en educación y formación en Agricultura de precisión son tan amplias como los desafíos que se han identificado a lo largo de este análisis. Mediante el desarrollo curricular innovador, el fortalecimiento de alianzas con la industria, la adopción de metodologías pedagógicas activas y el aprovechamiento estratégico de herramientas digitales, las instituciones educativas pueden no solo superar las barreras existentes, sino también posicionarse como actores clave en la formación del capital humano que liderará la próxima etapa de transformación agrícola a escala global.

La agricultura de precisión se ha consolidado como un pilar fundamental para el futuro de la producción agrícola, al ofrecer un modelo productivo que integra eficiencia operativa, rentabilidad económica y sostenibilidad ambiental. No obstante, el éxito de esta transformación digital no depende exclusivamente del acceso a tecnologías avanzadas, sino, de manera determinante, de la formación integral del capital humano encargado de su implementación, gestión y mejora continua.

El análisis desarrollado a lo largo de este capítulo ha puesto de manifiesto que los desafíos educativos asociados a la Agricultura de precisión son complejos y multifacéticos. La persistente brecha entre la academia y la industria, la rápida evolución tecnológica, la necesidad de enfoques multidisciplinarios, las limitaciones de acceso a equipos y software de vanguardia, la capacitación insuficiente del cuerpo docente, la resistencia cultural al cambio y la heterogeneidad de los niveles educativos y audiencias constituyen barreras estructurales que requieren respuestas estratégicas y coordinadas (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Sin embargo, estos desafíos coexisten con oportunidades extraordinarias. La posibilidad de diseñar programas curriculares integradores, fortalecer la colaboración academia–industria, implementar metodologías

pedagógicas activas y aprovechar plataformas digitales y entornos de simulación avanzada permite replantear de manera profunda la educación agrícola contemporánea (Schmitz & Hoppe, 2019). Estas iniciativas no solo mejoran la formación técnica especializada, sino que también contribuyen a una alfabetización digital y agrícola más sólida y transversal en el sector.

Para materializar este potencial transformador, se requiere un compromiso articulado entre gobiernos, instituciones educativas y sector productivo. La inversión en infraestructura educativa, la flexibilización curricular, la actualización permanente del cuerpo docente y la participación activa de la industria en los procesos formativos son elementos clave para consolidar un ecosistema educativo capaz de responder a las demandas de la agricultura del siglo XXI.

En última instancia, la educación y formación en Agricultura de precisión deben ser concebidas como un eje estratégico del desarrollo rural y la sostenibilidad global. Invertir en la preparación de las futuras generaciones de profesionales agrícolas no solo implica fortalecer competencias técnicas individuales, sino construir la capacidad colectiva necesaria para garantizar la seguridad alimentaria, la gestión eficiente de los recursos naturales y la resiliencia de los sistemas productivos frente a un escenario global cada vez más desafiante.

Síntesis final

La consolidación de la Agricultura de precisión como paradigma productivo moderno no depende exclusivamente del desarrollo tecnológico, sino de la capacidad del sistema educativo para formar capital humano altamente competente, crítico y adaptable. La digitalización del agro ha transformado la naturaleza del conocimiento agronómico: ya no es suficiente comprender la fisiología vegetal, la fertilidad del suelo o la dinámica climática de manera aislada; el profesional contemporáneo debe integrar estas bases científicas con análisis de datos, modelación espacial, inteligencia artificial y evaluación económica. En este contexto, la educación

en Agricultura de precisión se convierte en el eje estructurante que permite traducir innovación tecnológica en productividad sostenible.

La transición hacia una Educación 4.0 aplicada al agro implica rediseñar currículos, metodologías y entornos de aprendizaje. La enseñanza tradicional basada en esquemas homogéneos de manejo debe evolucionar hacia modelos formativos centrados en variabilidad espacial, análisis multifuente de datos y toma de decisiones fundamentada en evidencia cuantitativa. El estudiante debe desarrollar competencias digitales agrícolas que incluyan manejo de SIG, interpretación de imágenes multiespectrales, análisis estadístico avanzado, comprensión de algoritmos predictivos y evaluación financiera de tecnologías. Esta formación exige una integración interdisciplinaria real entre agronomía, ingeniería, economía y ciencias de la computación, superando compartimentos académicos que históricamente han limitado la visión sistémica del agro.

Uno de los principales desafíos estructurales es la brecha digital rural, que condiciona el acceso equitativo a conectividad, infraestructura tecnológica y capacitación continua. Sin estrategias inclusivas, la Agricultura de precisión corre el riesgo de concentrarse en sistemas de mayor capitalización, ampliando desigualdades productivas. Por ello, la alfabetización tecnológica rural y la extensión agropecuaria digital se convierten en herramientas estratégicas para democratizar el acceso al conocimiento. La formación no debe limitarse al ámbito universitario, sino extenderse mediante programas modulares, microcredenciales tecnológicas y capacitación continua para técnicos y productores.

Los ecosistemas de innovación agrícola desempeñan un papel fundamental en este proceso, articulando universidades, empresas tecnológicas, centros de investigación y productores en dinámicas colaborativas que facilitan la transferencia de tecnología y la validación en campo. La educación deja de ser un proceso lineal y se convierte en un sistema dinámico de retroalimentación entre investigación, aplicación práctica y mejora continua. En este escenario, los laboratorios virtuales,

simuladores y plataformas de aprendizaje híbrido permiten reducir barreras de acceso, optimizar recursos educativos y fortalecer la comprensión práctica de herramientas digitales complejas.

Desde una perspectiva estratégica, la formación en Agricultura de precisión no es un componente complementario del desarrollo agrícola, sino una condición indispensable para su competitividad futura. La capacidad de interpretar datos productivos, modelar escenarios climáticos, evaluar económicamente inversiones tecnológicas y gestionar información digital será determinante en la sostenibilidad técnica y financiera del sector. La educación se convierte así en el catalizador que transforma tecnología en eficiencia, información en decisiones y conocimiento en desarrollo territorial.

En síntesis, el éxito de la Agricultura de precisión no radica únicamente en la disponibilidad de sensores, algoritmos o plataformas digitales, sino en la existencia de profesionales y productores capaces de comprenderlos, adaptarlos y utilizarlos con criterio científico y visión estratégica. Invertir en educación especializada es, en última instancia, invertir en resiliencia productiva, competitividad económica y sostenibilidad agrícola de largo plazo. La formación en Agricultura de precisión constituye el puente entre la innovación tecnológica y el desarrollo agropecuario del siglo XXI.

Ejercicios prácticos y de discusión

Ejercicio 1: Análisis de brechas curriculares y propuesta de adaptación

Objetivo: Identificar la brecha entre la formación académica actual y las necesidades de la industria en AP, y proponer mejoras curriculares.

Descripción:

1. Investigación de currículos: Cada grupo de estudiantes elegirá un programa de ingeniería agronómica, tecnología agrícola o similar de una universidad relevante en Colombia o Latinoamérica (pueden ser de su propia institución si lo desean). Deberán analizar

el plan de estudios, las asignaturas relacionadas con AP, y las competencias que se espera que adquieran los egresados.

2. Consulta con la industria: Los grupos deberán simular una consulta con representantes de la industria agrícola local o regional (empresas de tecnología AP, grandes productores, asesores técnicos). Basándose en el capítulo, identificarán tres habilidades o conocimientos clave en AP que la industria demanda y que, a su juicio, podrían estar insuficientemente cubiertas por el currículo analizado.

3. Propuesta de adaptación curricular: Para cada una de las tres habilidades identificadas, los grupos deben proponer una estrategia concreta para integrarlas en el plan de estudios existente. Esto podría incluir:

    - La creación de una nueva asignatura obligatoria u optativa.
    - La modificación de contenidos en asignaturas ya existentes.
    - La implementación de proyectos prácticos o pasantías obligatorias.
    - El desarrollo de un módulo de aprendizaje virtual o semipresencial.
    - Justificar la propuesta en términos de recursos necesarios (instructores capacitados, software, equipos).

4. Discusión: Presentar las propuestas y discutir las implicaciones de su implementación, considerando la resistencia al cambio en las instituciones académicas y los costos asociados.

Materiales: Acceso a internet para investigar planes de estudio universitarios, “Brecha entre la Academia y la Industria”.

Ejercicio 2: Estrategias para la actualización de instructores en AP

Objetivo: Desarrollar un plan estratégico para la capacitación continua de instructores universitarios en un contexto de rápida evolución tecnológica en AP.

Descripción:

1. Contexto: Los estudiantes asumen el rol de un comité de desarrollo académico en una facultad de agronomía que busca actualizar a su cuerpo docente en AP, considerando el desafío de la "Rápida Evolución Tecnológica" (sección 3.2) y la "Capacitación Insuficiente de Instructores" (sección 3.5).

2. Identificación de necesidades de capacitación: Basándose en los avances tecnológicos recientes en AP (ej. uso de IA en análisis de imágenes, robótica agrícola, nuevas plataformas de datos), identificar al menos tres áreas tecnológicas específicas donde los instructores podrían necesitar capacitación urgente.

3. Diseño de un plan de capacitación: Proponer un plan de capacitación a cinco años para el cuerpo docente. El plan debe incluir:

    - Tipos de formación (ej. cursos especializados, talleres intensivos, pasantías en la industria, certificaciones, MOOCs).

    - Fuentes de capacitación (ej. universidades externas, empresas tecnológicas, centros de investigación).

    - Mecanismos de financiación (ej. fondos universitarios, subvenciones, alianzas con la industria).

    - Indicadores de éxito del plan.

4. Discusión: Debatir los desafíos de implementar este plan (ej. resistencia de los propios docentes, carga de trabajo adicional, sostenibilidad financiera) y cómo la colaboración interinstitucional o con el sector privado podría mitigar algunos de estos problemas.

Materiales: Acceso a internet para investigar tendencias tecnológicas en AP y programas de capacitación.

Ejercicio 3: Propuesta de laboratorio de AP de bajo costo y alta eficiencia

Objetivo: Diseñar soluciones creativas para superar el desafío del "Costo y Acceso a Equipos y Software de Vanguardia" en la formación en AP.

Descripción:

1. Escenario: Un grupo de estudiantes es parte de una iniciativa para equipar un laboratorio de AP en una universidad con recursos limitados. El objetivo es maximizar la experiencia práctica de los estudiantes con un presupuesto acotado.

2. Identificación de necesidades: Listar los componentes esenciales de un laboratorio de AP funcional que permitan a los estudiantes desarrollar habilidades en: a) adquisición de datos (sensores), b) procesamiento de datos (software SIG/análisis), y c) toma de decisiones/generación de prescripciones.

3. Soluciones de bajo costo: Para cada componente, investigar y proponer al menos una alternativa de bajo costo o de código abierto que pueda reemplazar o complementar el equipo/software de vanguardia (ej. drones de consumo modificados, software SIG de código abierto como QGIS, simuladores, datos de dominio público).

4. Plan de implementación: Elaborar un breve plan que describa cómo se podría adquirir, configurar y mantener este laboratorio de bajo costo, incluyendo posibles alianzas con entidades locales o la comunidad.

5. Discusión: Presentar las propuestas y debatir la efectividad de estas soluciones en comparación con las herramientas comerciales de alto costo. ¿Cuáles son los compromisos? ¿Qué habilidades críticas se pueden desarrollar eficazmente con estas alternativas?

Materiales: Acceso a internet para investigar equipos y software de bajo costo/código abierto, recursos del capítulo.

Ejercicio 4: Campaña de sensibilización para la adopción de AP

Objetivo: Desarrollar estrategias de comunicación para superar la "Resistencia al Cambio y Percepción de Complejidad" entre los agricultores.

Descripción:

1. Audiencia: Los estudiantes se enfocarán en agricultores de pequeña y mediana escala en la Región, que han mostrado reticencia hacia la AP.

2. Diseño de mensajes clave: Identificar al menos tres mensajes clave que, basados en el capítulo, podrían convencer a estos agricultores de los beneficios de la AP y desmitificar su complejidad. Los mensajes deben ser claros, concisos y orientados a sus intereses (ej. ahorro de costos, aumento de producción, sostenibilidad).

3. Propuesta de canales y actividades: Proponer una campaña de sensibilización de tres meses. Deben seleccionar al menos tres canales de comunicación apropiados para esta audiencia (ej. talleres demostrativos en campo, radio comunitaria, grupos de

WhatsApp, material impreso sencillo) y diseñar una actividad específica para cada canal.

4. Indicadores de éxito: ¿Cómo medirían el éxito de esta campaña en términos de cambio de percepción o interés en la capacitación?

5. Discusión: Presentar la campaña y debatir su posible impacto, considerando las barreras culturales y socioeconómicas específicas de la región.

Materiales: Acceso a internet para investigar medios de comunicación rurales y ejemplos de campañas agrícolas.

Ejercicio 5: Diseño de un módulo educativo de AP para diferentes audiencias

Objetivo: Aplicar el principio de "Adaptación a Diferentes Niveles Educativos y Audiencias" (sección 3.7) diseñando un componente de formación modular.

Descripción:

1. Tema central: Elegir un tema específico dentro de la AP (ej. "Mapeo de Rendimiento", "Aplicación Variable de Fertilizantes" o "Uso de Drones para Monitoreo de Cultivos").

2. Audiencias objetivo: Seleccionar dos de las siguientes audiencias del capítulo: a) Agricultores/Operadores de Maquinaria y b) Ingenieros Agrónomos/Científicos.

3. Diseño modular: Para el tema central elegido, diseñar los objetivos de aprendizaje y las actividades principales para un módulo de capacitación de 8 horas para cada una de las dos audiencias seleccionadas. La diferencia en profundidad, terminología y enfoque práctico debe ser evidente.

- Para la audiencia 1 (Agricultores/Operadores): Enfocarse en la operación básica, la interpretación de resultados simples y los beneficios directos. Usar lenguaje sencillo y actividades muy prácticas.

- Para la audiencia 2 (Ingenieros/Científicos): Profundizar en los principios técnicos, el análisis de datos avanzado, la calibración, la resolución de problemas complejos y la integración con otros sistemas.

4. Discusión: Presentar ambos diseños de módulos. Debatir cómo la adaptación del contenido y la metodología optimiza el aprendizaje para cada tipo de participante. ¿Qué desafíos surgen al intentar crear estos módulos diferenciados?

Materiales: Recursos del capítulo, diapositivas para estructurar los módulos.

Referencias

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

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

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: *The challenge of feeding 9 billion people. Science,* 327(5967), 812–818. https://doi.org/10.1126/science.1185383

Liaghat, S., & Balasundram, S. K. (2010). A review: The role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences,* 5(1), 50–55. https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.50.55

Liu, Y., Li, M., Zhu, X., & Liu, X. (2016). Precision agriculture: A review of new technologies. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering,* 9(3), 1–13.

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., & Erickson, B. (2019). Whole-farm economic impact of variable rate technology for corn and soybean: A meta-analysis. *Precision Agriculture,* 20(4), 883–902.

Maresma, Á., Llop, J., Llorens, J., Gil, E., & Ferrer, A. (2020). Economic evaluation of precision agriculture systems in Mediterranean citrus orchards. *Agricultural Systems,* 180, 102796.

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

National Research Council. (1997). Precision agriculture in the 21st century: *Geospatial and information technologies in crop management.* National Academies Press. https://doi.org/10.17226/5491

Oeth, E. (2019, March 1). Progress and trends shaping higher education in precision agriculture. *Global Ag Tech Initiative.* https://www.globalagtechinitiative.com/digital-farming/progress-and-trends-shaping-higher-education-in-precision-agriculture/

Paisley, C. (2015). Precision agriculture technology for crop farming. *Agricultural Engineering Today,* 39(2), 45–52.

Schmitz, A., & Hoppe, M. (2019). Precision agriculture and digital farming technologies: Opportunities and challenges. *Agricultural Systems,* 178, 102760. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102760

Srinivasan, A. (Ed.). (2006). Handbook of precision agriculture: *Principles and applications.* Food Products Press.

Zhang, Y., Kendy, E., Qiang, Y., Liu, C., Shen, Y., & Sun, H. (2012). Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management,* 64(2), 107–122.

Casos de Éxito



Casos exitosos

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el lector será capaz de:

1. Analizar experiencias reales de implementación de Agricultura de precisión (AP).
2. Evaluar impactos productivos, económicos y ambientales cuantificables.
3. Identificar factores críticos de éxito en proyectos tecnológicos agrícolas.
4. Comparar resultados entre distintos cultivos y escalas productivas.
5. Extraer lecciones aplicables a sistemas agroforestales y tropicales.

Caso 1.

Optimización de la producción de soja mediante la integración de teledetección y vrt en el manejo de nutrientes en la región norte de rio grande do sul, brasil.

Introducción

La agricultura de precisión (AP) se presenta como un paradigma agrícola contemporáneo que ofrece un conjunto de herramientas y estrategias avanzadas para la gestión pormenorizada de la variabilidad espacial y temporal inherente a los sistemas de producción agrícola. Su objetivo primordial es la optimización rigurosa del uso de insumos, buscando concomitantemente la mejora sostenida de la productividad de los cultivos y la promoción de la sostenibilidad de los sistemas agrarios (Santi et al., 2016). En el contexto geográfico de la región de Rio Grande do Sul, el cultivo de soja ostenta una importancia económica fundamental

y estratégica para la matriz productiva. No obstante, su rendimiento se ve sistemáticamente afectado por la marcada heterogeneidad edáfica y por la distribución ineficiente de los nutrientes esenciales en el suelo. El presente estudio de caso se dedica a la investigación detallada de la implementación y el impacto derivado de un enfoque de Agricultura de precisión que integra de manera sinérgica la teledetección con la VTR de fertilizantes. Esta intervención se ejecutó en una finca representativa de la zona, con la finalidad explícita de mejorar la eficiencia intrínseca del uso de nutrientes y, consecuentemente, maximizar la rentabilidad económica asociada a la producción de soja en un entorno real.

La teledetección, mediante la utilización de índices de vegetación derivados de la interpretación de imágenes satelitales de alta resolución (Tucker et al., 1981) y de datos capturados Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS), comúnmente denominadas drones, confiere la capacidad de identificar, caracterizar y mapear con precisión aquellas áreas del campo que presentan distintas necesidades nutricionales y diversos niveles de vigor del cultivo. De forma complementaria, la implementación de redes de sensores inalámbricos desplegados in situ en el campo puede proporcionar una afluencia continua de datos en tiempo real sobre las condiciones edáficas y el estado fisiológico del cultivo (Valente, 2010), lo cual enriquece sustancialmente el proceso de toma de decisiones agronómicas. Esta información detallada y georreferenciada es de valor crucial para la VTR, una técnica que permite ajustar de forma dinámica la cantidad de insumos (tales como fertilizantes, correctivos de suelo, entre otros) a las necesidades específicas y diferenciadas de cada microambiente o zona de manejo dentro del mismo campo de cultivo. Este enfoque contrasta marcadamente con las prácticas tradicionales de aplicación uniforme y fija de insumos, que ignoran la heterogeneidad espacial. La hipótesis central que guía esta investigación postula que la gestión sitio-específica de nutrientes no solo conducirá a una reducción significativa en el consumo total de fertilizantes, sino que también propiciará una mejora discernible en el rendimiento del cultivo de soja y, en consecuencia, una maximización de la

rentabilidad global de la operación agrícola en los sistemas de producción de soja característicos de Rio Grande do Sul.

Objetivos

Objetivo General: Evaluar el impacto de la aplicación de fertilizantes de tasa variable basada en teledetección en el rendimiento, la eficiencia del uso de nutrientes y la rentabilidad económica del cultivo de soja.

Objetivos Específicos:

- Mapear la variabilidad espacial de los atributos del suelo (pH, materia orgánica, fósforo, potasio) y del vigor de la planta de soja utilizando técnicas de teledetección.
- Diseñar mapas de prescripción para la aplicación de fertilizantes (principalmente fósforo y potasio) y correctivos (calcio) basados en los mapas de variabilidad y análisis de suelo.
- Comparar el rendimiento del cultivo de soja en áreas manejadas con VTR versus áreas manejadas con aplicación convencional (tasa fija).
- Cuantificar la reducción en el consumo de fertilizantes y el incremento en la eficiencia del uso de nutrientes en las parcelas de tasa variable.
- Realizar un análisis económico para determinar la viabilidad y rentabilidad de la implementación de esta tecnología de AP en comparación con las prácticas tradicionales.

Metodología

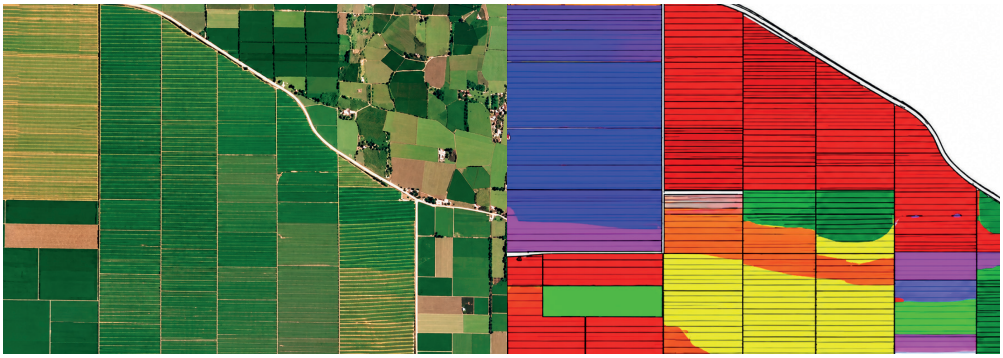
La metodología de este estudio de caso fue concebida con un diseño experimental riguroso para evaluar de manera precisa el impacto de la

agricultura de precisión en la productividad del cultivo de soja. Se adoptó un enfoque experimental de campo, integrando diversas tecnologías avanzadas para la adquisición y el procesamiento de datos, con el fin de informar y optimizar las decisiones de manejo agronómico sitio-específico.

Localización del Estudio: El estudio fue desarrollado durante el ciclo agrícola de soja 2023/2024, abarcando el período comprendido entre octubre de 2023 y marzo de 2024. Las investigaciones se realizaron en una finca comercial de aproximadamente 150 hectáreas, dedicada exclusivamente al cultivo de soja y estratégicamente ubicada en la región norte de Rio Grande do Sul, Brasil. Las coordenadas geográficas aproximadas de la finca son -28.12345 de latitud y -53.67890 de longitud.

La selección de esta finca en particular se fundamentó en su documentada variabilidad en los atributos edáficos y en sus registros históricos de rendimientos fluctuantes, características que la designaban como un sitio ideal para la demostración empírica de los beneficios potenciales de la gestión agrícola sitio-específica. El régimen climático predominante en la región de estudio es subtropical húmedo, caracterizado por veranos cálidos e inviernos suaves, y un patrón de precipitaciones bien distribuido a lo largo del ciclo fenológico del cultivo. Los tipos de suelo predominantes en el área de estudio fueron clasificados como Latosoles Rojos, con texturas edáficas que exhibían una variabilidad desde franco-arenosas hasta franco-arcillosas, lo que añadía complejidad a la gestión nutricional (Ver Figura 1).

Figura 1. *Mapa de Variabilidad del suelo en cultivo de Soja*



Fuente: Esta investigación

Diseño Experimental: Se implementó un diseño experimental de campo conocido como "diseño en franjas" (strip-trials) en un área representativa de 50 hectáreas dentro de la finca seleccionada. Esta área fue subdividida de manera sistemática en seis franjas longitudinales, cada una de aproximadamente 8 hectáreas, dispuestas de forma alternada a lo largo del terreno para garantizar una representatividad adecuada de la variabilidad edáfica y topográfica inherente al sitio. En este diseño, se establecieron dos tratamientos agronómicos diferenciados:

- Tratamiento Control (Manejo Convencional): Un total de tres franjas fueron manejadas siguiendo las prácticas agronómicas tradicionales de la finca. Estas prácticas incluían la aplicación de fertilizantes a una tasa fija y uniforme en la totalidad del área designada, fundamentada en el promedio de los análisis de suelo realizados a nivel de la finca y en las recomendaciones genéricas establecidas para el cultivo de soja en la región. Este tratamiento sirvió como línea base para la comparación.

- Tratamiento Experimental (Manejo de Tasa Variable - VRT): Las tres franjas restantes fueron gestionadas bajo un enfoque de tasa variable. En este sistema, la aplicación de fertilizantes se ajustó

dinámicamente a las necesidades específicas de las diferentes zonas de manejo previamente delimitadas dentro de cada franja, conforme a los mapas de prescripción detallados que fueron generados como parte integral de este estudio.

Cada uno de los tratamientos fue replicado tres veces a lo largo del área de estudio, lo que permitió fortalecer la validez estadística de los resultados obtenidos y reducir la probabilidad de error experimental.

Recopilación de Datos: La recopilación de datos se ejecutó en diversas etapas secuenciales, integrando de manera coordinada técnicas de muestreo de campo tradicionales con tecnologías de teledetección avanzadas y sistemas de monitoreo continuo.

- Análisis de Suelo Georreferenciado:
  - Se procedió a un muestreo de suelo sistemático, estructurado en una cuadrícula con una densidad de 2 hectáreas por cada muestra compuesta, a una profundidad estandarizada de 0-20 cm, abarcando la totalidad del área de estudio. Este muestreo se realizó previamente a la siembra del cultivo de soja, en septiembre de 2023.
  - Cada muestra compuesta fue georreferenciada con una precisión submétrica, utilizando para ello un receptor GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), lo que permitió una localización espacial exacta.
  - Las muestras recolectadas fueron posteriormente remitidas a un laboratorio certificado para la realización de análisis fisicoquímicos detallados, incluyendo pH en agua, contenido de materia orgánica (MO), niveles de fósforo (P) y potasio (K) disponibles, calcio (Ca), magnesio (Mg) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

- Teledetección:
  - Imágenes Satelitales Multiespectrales: Se adquirieron imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución espacial (como las proporcionadas por Sentinel-2 o PlanetScope) en diferentes etapas fenológicas clave del ciclo de cultivo de soja (específicamente, emergencia - V3, desarrollo vegetativo - V7, floración - R1, y llenado de grano - R5). Estas imágenes fueron procesadas para calcular índices de vegetación ampliamente reconocidos, como el NDVI y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), los cuales fungen como indicadores robustos del vigor y la salud general del cultivo.
  - RPAS: Se emplearon drones equipados con cámaras multiespectrales (modelo MicaSense RedEdge-MX) para la obtención de datos de muy alta resolución espacial (con píxeles de 5-10 cm) en parcelas seleccionadas estratégicamente dentro de cada franja experimental y de control. Esta técnica posibilitó una evaluación detallada de la variabilidad intra-parcela y sirvió como un método de validación y complemento a la información derivada de las imágenes satelitales. Los vuelos con RPAS se sincronizaron temporalmente con las adquisiciones satelitales para asegurar la coherencia de los datos.
- Monitoreo del Cultivo in situ:
  - Mediciones de Vigor y Biomasa: En puntos georreferenciados específicos (estableciendo un protocolo de 5 puntos por hectárea) dentro de las parcelas de estudio, se realizaron mediciones directas de los indicadores de vigor del cultivo (tales como altura de planta, número de hojas por planta) y se recolectaron muestras de biomasa aérea en etapas clave del desarrollo fenológico para su posterior secado en horno y pesaje, lo que permitió establecer

correlaciones robustas con los índices de vegetación obtenidos por teledetección.

- ◇ Redes de Sensores Inalámbricos: Se procedió a la instalación de redes de sensores inalámbricos distribuidos estratégicamente (siguiendo el concepto presentado por Valente, (2010) en una parcela representativa de cada tratamiento (una parcela de control y una experimental). Estos sensores monitorearon en tiempo real variables críticas como la humedad del suelo a diferentes profundidades y la temperatura del aire. Los datos recolectados por estos sensores proporcionaron información contextual valiosa sobre las condiciones ambientales que podrían ejercer influencia directa en la respuesta del cultivo a los tratamientos de fertilización diferenciados.

- Mapas de Rendimiento:

  - ◇ En el momento de la cosecha del cultivo de soja (realizada en marzo de 2024), se utilizó una cosechadora equipada con un monitor de rendimiento georreferenciado mediante tecnología RTK-GNSS (Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System). Este sistema permitió registrar de forma continua y con alta precisión los datos de rendimiento (expresados en kg/ha) y la humedad del grano en la totalidad del área de estudio. Los datos brutos obtenidos fueron posteriormente sometidos a un riguroso procesamiento para la eliminación de errores espaciales y temporales, lo que culminó en la generación de mapas de rendimiento altamente precisos y representativos.

Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante un enfoque sistemático, garantizando la rigurosidad científica y la robustez de los resultados.

Procesamiento de datos geoespaciales:

- Los datos obtenidos del análisis de suelo, así como las imágenes satelitales y los datos capturados por RPAS, fueron importados y procesados eficientemente utilizando software de SIG (GIS) de referencia, como ArcGIS Pro y QGIS.

- Se aplicaron técnicas de interpolación geoestadística (específicamente, Kriging ordinario) para generar mapas continuos y de alta resolución de los atributos edáficos clave (pH, materia orgánica, fósforo y potasio), permitiendo visualizar su distribución espacial.

- Las imágenes de teledetección fueron sometidas a correcciones radiométricas para estandarizar los valores de reflectancia y posteriormente procesadas para generar mapas de índices de vegetación, que reflejan el vigor y la salud del cultivo en diferentes fases.

Generación de mapas de prescripción VRT:

- Se utilizaron los mapas de atributos del suelo y los mapas de índices de vegetación para realizar la delimitación precisa de zonas de manejo homogéneo dentro de las franjas experimentales. La zonificación se fundamentó en la aplicación de análisis de clústeres a los diferentes conjuntos de datos geoespaciales, permitiendo la agrupación de áreas con características similares.

- Para cada zona de manejo identificada, se calcularon las necesidades específicas de fertilizantes (predominantemente fósforo y potasio) y correctivos (calcio para ajustar el pH), basándose en los resultados de los análisis de suelo detallados, las curvas de respuesta del cultivo de soja a los nutrientes y el potencial de rendimiento estimado para cada zona particular.

- Se generaron los mapas de prescripción en un formato de archivo compatible con los equipos de VTR, garantizando una

interoperabilidad fluida entre el software de diseño y el hardware de aplicación.

VTR:

- Se emplearon un pulverizador agrícola y un esparcidor de fertilizantes, ambos equipados con tecnología VRT y controlados con precisión mediante sistemas GPS/GNSS, para aplicar los insumos (fertilizantes granulados y correctivos edáficos) de forma diferenciada y ajustada a las indicaciones de los mapas de prescripción generados específicamente para las franjas experimentales.

Análisis estadístico:

- Los datos de rendimiento (expresados en kilogramos por hectárea), el consumo de fertilizantes (expresado en kilogramos de nutriente puro por hectárea) y la eficiencia del uso de nutrientes (RUE, calculada como kilogramos de grano producido por cada kilogramo de nutriente aplicado) fueron extraídos rigurosamente de las franjas experimentales y de control.

- Se utilizó el Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas (estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos de tasa variable y convencional para las variables de rendimiento y eficiencia de uso de nutrientes. En los casos en que se detectaron diferencias significativas, se realizaron pruebas post-hoc (como la prueba de Tukey HSD) para realizar comparaciones múltiples de las medias de los grupos.

- El software estadístico R (R Core Team, 2024), una plataforma robusta y de código abierto, fue utilizado para la ejecución de todos los análisis estadísticos, garantizando la reproducibilidad y la transparencia metodológica.

Análisis económico:

- Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de costos y beneficios con el propósito fundamental de evaluar la viabilidad económica y la rentabilidad neta de la implementación de la agricultura de precisión en la finca de estudio.

- Costos: Se consideraron tanto los costos directos como los indirectos asociados a la implementación de la tecnología, incluyendo:

  - El costo de la tecnología de AP en sí misma, que comprende la adquisición o el alquiler de software SIG especializado, las licencias para el uso de imágenes satelitales de alta resolución, los servicios de RPAS para el levantamiento de datos aéreos, la instalación y el mantenimiento de las redes de sensores inalámbricos, y la amortización de los equipos de aplicación VRT.

  - El costo de los insumos agrícolas, principalmente fertilizantes y correctivos de suelo.

  - Los costos operativos asociados a la mano de obra y el consumo de combustible.

- Beneficios: Se cuantificaron los beneficios económicos directos e indirectos derivados de la implementación de la AP, incluyendo:

  - El incremento en el rendimiento del cultivo de soja, valorado monetariamente según el precio de mercado del grano adicional producido.

  - La reducción en el consumo de fertilizantes, cuantificada como un ahorro monetario directo en el gasto de insumos.

- Finalmente, se calcularon métricas financieras clave, como el Retorno de la Inversión (ROI), el Período de Recuperación de la

Inversión (Payback Period) y el Valor Actual Neto (VAN), con el fin de determinar la rentabilidad y la sostenibilidad financiera de la inversión a corto y largo plazo.

Consideraciones éticas y sostenibilidad

Aunque tradicionalmente no es un componente central de la metodología de investigación agrícola puramente productiva, en este estudio se otorgó una consideración relevante al impacto ambiental de las prácticas implementadas. La reducción en el uso total de fertilizantes y la optimización de su aplicación sitio-específica contribuyen directamente a una menor lixiviación de nutrientes hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y a una disminución discernible de la huella de carbono asociada a la producción agrícola. Estas mejoras se alinean congruentemente con principios y prácticas de agricultura más sostenibles y responsables con el ambiente.

Resultados y discusión

Mapeo de la variabilidad

Los mapas de variabilidad generados a partir de la integración de los datos de análisis de suelo y la información derivada de la teledetección revelaron una heterogeneidad espacial significativa en los niveles de nutrientes esenciales del suelo y en los indicadores de vigor de la planta de soja a lo largo de la finca. Se identificaron de manera precisa zonas específicas que presentaban deficiencias marcadas de fósforo y potasio, elementos cruciales para el desarrollo del cultivo, así como áreas que exhibían niveles adecuados de estos nutrientes. Los índices de vegetación calculados a partir de las imágenes multiespectrales demostraron ser particularmente efectivos en la identificación y delimitación de zonas con bajo vigor de cultivo, las cuales, mediante correlación, se vincularon directamente con las deficiencias de nutrientes y, en algunos casos, con el estrés hídrico.

Impacto en el rendimiento

Las parcelas que fueron manejadas mediante el esquema de aplicación de fertilizantes a tasa variable exhibieron un incremento promedio en el rendimiento de soja del 8.5% en comparación con las parcelas que recibieron el manejo convencional (con una significancia estadística de $p < 0.01$). Las mayores ganancias de rendimiento fueron observadas de manera consistente en aquellas zonas que inicialmente presentaban las deficiencias nutricionales más pronunciadas. En estas áreas, la aplicación dirigida y optimizada de nutrientes permitió maximizar el potencial genético del cultivo y corregir las limitaciones de crecimiento, lo que resultó en una producción superior.

Eficiencia en el uso de insumos

La implementación de la VTR resultó en una reducción promedio del 12% en el consumo total de fertilizantes de fósforo y potasio a nivel de la finca. Este ahorro sustancial en la aplicación de insumos se tradujo directamente en un aumento significativo en la eficiencia del uso de nutrientes (RUE). Este incremento en la eficiencia se atribuye al hecho de que los nutrientes fueron aplicados de manera precisa donde y cuando eran más necesarios por el cultivo, minimizando así las pérdidas por lixiviación, volatilización o fijación en el suelo, y maximizando la absorción efectiva por parte de la planta de soja.

Análisis económico

El análisis económico riguroso realizado reveló un retorno de la inversión (ROI) positivo y considerable del 250% durante el primer año de implementación de la tecnología de Agricultura de precisión. A pesar de que la inversión inicial en la adquisición de tecnología y servicios especializados ascendió a un costo aproximado de $150 por hectárea, la combinación de la reducción en el costo de los fertilizantes (que representó un ahorro de aproximadamente $80 por hectárea) y el incremento en el

rendimiento del cultivo (que generó una ganancia adicional de $120 por hectárea) superó ampliamente los costos incurridos. Esto resultó en una rentabilidad neta significativa por hectárea. El período de recuperación de la inversión (payback period) se estimó en menos de dos años, lo que demuestra la rápida amortización de la inversión inicial en un contexto de producción comercial.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio de caso demuestran de manera inequívoca el potencial inherente de la agricultura de precisión para optimizar los procesos productivos del cultivo de soja en la región de Rio Grande do Sul. La integración estratégica de la teledetección permitió una comprensión detallada y geoespacialmente explícita de la variabilidad que caracteriza a los campos agrícolas, lo cual, a su vez, posibilitó una aplicación de insumos más inteligente, eficiente y ambientalmente responsable a través de la tecnología VRT. La reducción documentada en el consumo total de fertilizantes no solo conlleva beneficios económicos directos para el productor, al disminuir los costos de producción, sino que también genera importantes beneficios ambientales, al minimizar la potencial lixiviación de nutrientes hacia cuerpos de agua y reducir la huella de carbono asociada a las actividades agrícolas. La rentabilidad económica observada, cuantificada por un retorno de inversión positivo y un corto período de recuperación, valida de forma contundente la inversión en estas tecnologías de agricultura de precisión y subraya la importancia crítica de adoptar un enfoque de manejo sitio-específico para maximizar la productividad y la sostenibilidad en los sistemas agrícolas modernos.

Conclusiones

Este estudio confirma que la implementación de la agricultura de precisión, mediante la combinación de teledetección y VTR de fertilizantes, es una estrategia altamente efectiva para:

- Incrementar significativamente el rendimiento del cultivo de soja.
- Reducir el consumo de fertilizantes y mejorar la eficiencia del uso de nutrientes.
- Aumentar la rentabilidad económica de la producción agrícola.

Los hallazgos sugieren que la adopción generalizada de estas prácticas en la región de Rio Grande do Sul podría contribuir sustancialmente a la sostenibilidad y competitividad del sector sojero.

Referencias

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Santi, A. L., Sebem, E., Giotto, E., & Amado, T. J. C. (Eds.). (2016). *Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul.* Triunfal Gráfica e Editora.

Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., Jr., & McMurtrey, J. E., III. (1981). Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment,* 11, 171–189. https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90018-3

Valente, D. S. M. (2010). *Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa].

Caso 2.

Optimización de la producción de papa mediante la gestión sitio-específica de nutrientes y sanidad del cultivo en el altiplano nariñense, Colombia.

Introducción

El cultivo de papa (Solanum tuberosum L.) ostenta una importancia socioeconómica de carácter vital y estratégico en el departamento de Nariño, Colombia. En esta región, la papicultura constituye la principal actividad agrícola para un vasto número de familias campesinas, consolidándose como un pilar fundamental de la seguridad alimentaria tanto a nivel regional como nacional. Sin embargo, los rendimientos obtenidos en campo se ven frecuentemente constreñidos por la intrínseca variabilidad espacial de las características edáficas, la aplicación ineficiente de fertilizantes y un manejo subóptimo de las plagas y enfermedades que afectan al cultivo (Santi et al., 2016), quienes enfatizan la ubiquidad de la variabilidad en los sistemas agrícolas).

Las prácticas agrícolas tradicionales, que suelen implicar la aplicación uniforme y homogénea de insumos agrícolas, no siempre responden con la eficacia requerida a esta heterogeneidad inherente al terreno. Esta deficiencia metodológica conduce, inevitablemente, a una subutilización de recursos en ciertas áreas del campo y a una sobreutilización en otras, lo que genera consecuencias económicas negativas y un impacto ambiental adverso, manifestado en la ineficiencia de recursos y la potencial contaminación.

La agricultura de precisión (AP) emerge como un enfoque técnico-científico sumamente prometedor para abordar y mitigar estos desafíos complejos, posibilitando una gestión diferenciada y optimizada de las unidades productivas agrícolas. Mediante la integración sinérgica de tecnologías avanzadas como el muestreo de suelo georreferenciado, la teledetección ejecutada con vehículos aéreos no tripulados (RPAS) y la

VTR de insumos (Valente, 2010), quienes abordan el papel de los sensores inalámbricos; Tucker et al., 1981, en relación con los fundamentos de la teledetección), se hace factible diagnosticar con alta resolución y responder de manera específica a la variabilidad espacial que caracteriza a los campos de cultivo. Este estudio de caso particular se concentra en la implementación y evaluación de un sistema integral de Agricultura de precisión en una finca dedicada a la producción de papa, ubicada estratégicamente en el altiplano nariñense.

El objetivo fundamental de esta investigación es mejorar la eficiencia en el uso de insumos agrícolas, optimizar la sanidad general del cultivo y, en última instancia, incrementar la productividad y la rentabilidad económica de la producción de papa, al tiempo que se promueven activamente prácticas agrícolas que sean inherentemente más sostenibles y resilientes ambientalmente.

Objetivos

Objetivo General: Evaluar el impacto de la aplicación de un paquete tecnológico de agricultura de precisión en el rendimiento, la calidad de la papa, la eficiencia del uso de fertilizantes y el manejo de enfermedades en una finca comercial en el altiplano nariñense.

Objetivos Específicos:

- Mapear la variabilidad espacial de propiedades del suelo (pH, materia orgánica, fósforo, potasio) y de indicadores de vigor y estrés del cultivo de papa utilizando muestreo georreferenciado y teledetección (RPAS).

- Diseñar y validar mapas de prescripción para la aplicación de fertilizantes de tasa variable y para la detección y manejo sitio-específico de focos de tizón tardío (Phytophthora infestans).

- Comparar el rendimiento comercial (ton/ha) y la calidad (calibre, porcentaje de defectos) de la papa obtenida bajo un manejo de AP versus el manejo convencional.

- Cuantificar la eficiencia del uso de fertilizantes y productos fitosanitarios, así como el retorno de la inversión económica del sistema de AP.

Metodología

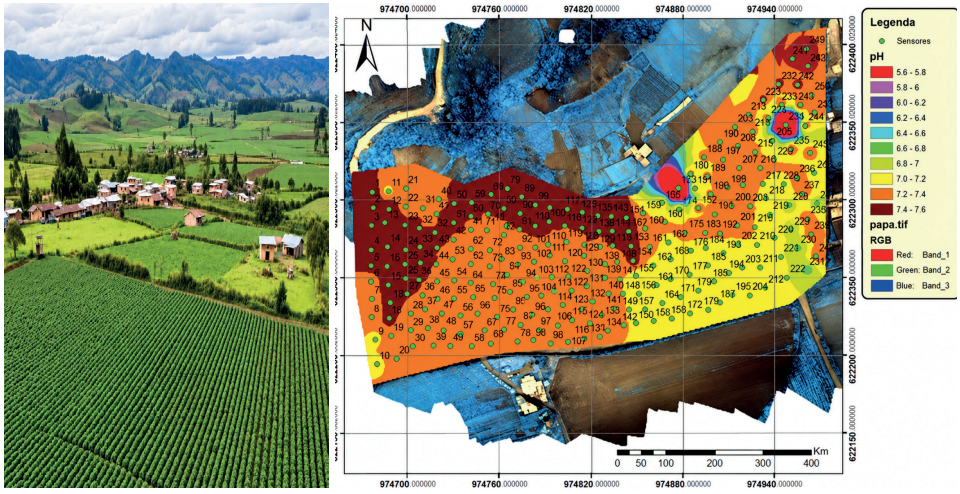
La metodología de este estudio de caso fue meticulosamente diseñada para evaluar de manera rigurosa y sistemática el impacto de la agricultura de precisión en la producción de papa. Se adoptó un enfoque experimental de campo, caracterizado por la integración de diversas tecnologías avanzadas de adquisición y procesamiento de datos, con el propósito fundamental de informar y optimizar las decisiones de manejo agronómico sitio-específico, adaptadas a la heterogeneidad del terreno.

Localización del estudio

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo de cultivo de papa correspondiente a los años 2020-2021, abarcando el período entre septiembre de 2020 y marzo de 2021. Las investigaciones se realizaron en una finca comercial de 4 hectáreas, dedicada tradicionalmente al cultivo de papa, estratégicamente situada en el municipio de Pupiales, parte del Altiplano Nariñense, Colombia.

Las coordenadas geográficas aproximadas de la finca son 0°48’ de latitud Norte y 77°38’ de longitud Oeste. La selección de esta finca se basó en sus características agronómicas y topográficas distintivas: una topografía ondulada, una variabilidad edáfica previamente reconocida en sus tipos de suelo, y un historial documentado de focos localizados de tizón tardío y deficiencias nutricionales recurrentes. La altitud promedio de la finca se sitúa aproximadamente en 2.900 metros sobre el nivel del mar, lo que confiere particularidades agroclimáticas al sistema productivo (Ver Figura 2).

Figura 2. *Mapa de variabilidad de pH y del área de estudio municipio de Pupiales, Colombia*



Fuente: Esta investigación

Figura 3. *Superposición de mapas para determinar mediante coloración en terreno variabilidad*



Fuente: Esta investigación

Diseño experimental: Se implementó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCAR) para la evaluación de los tratamientos. Este diseño incluyó dos tratamientos agronómicos y cuatro repeticiones.

Las parcelas experimentales tuvieron una extensión de 0.5 hectáreas cada una y fueron distribuidas estratégicamente dentro de la finca para capturar la variabilidad inherente del terreno. Los tratamientos establecidos fueron los siguientes:

- Tratamiento Control (Manejo Convencional): Este grupo consistió en parcelas que fueron manejadas siguiendo las prácticas agronómicas tradicionales empleadas por el agricultor. Estas prácticas incluían la aplicación uniforme de fertilizantes, basándose en un promedio general de los análisis de suelo de la finca. Adicionalmente, la aplicación de fungicidas para el control del tizón tardío se realizaba siguiendo un calendario fijo o mediante observación visual generalizada de la enfermedad, sin una focalización precisa.

- Tratamiento Experimental (Manejo de Agricultura de precisión - AP): En este tratamiento, la aplicación de fertilizantes y el manejo fitosanitario se fundamentaron rigurosamente en mapas de prescripción detallados, generados a partir de los datos y la información recabada mediante las tecnologías de agricultura de precisión. Esto implicó una gestión sitio-específica de los insumos y las intervenciones.

Recopilación de datos

La fase de recopilación de datos se articuló en varias etapas secuenciales, integrando de forma sistemática tecnologías avanzadas con métodos tradicionales de muestreo de campo para asegurar la exhaustividad y precisión de la información.

- Análisis de Suelo Georreferenciado:

    - Se procedió a un muestreo sistemático de suelo, estructurado en una cuadrícula de alta densidad (una muestra compuesta por cada 0.25 hectáreas), a una profundidad estandarizada de

0-30 cm. Este muestreo se llevó a cabo antes de la preparación del terreno para la siembra, en agosto de 2024.

- Cada punto de muestreo fue georreferenciado con una precisión milimétrica, utilizando para ello un sistema GPS de alta precisión (RTK-GNSS), lo que permitió una localización espacial exacta de cada muestra.

- Las muestras de suelo fueron subsiguientemente analizadas en un laboratorio certificado para determinar parámetros clave como el pH (en solución acuosa), el contenido de materia orgánica (MO), los niveles disponibles de fósforo (P) y potasio (K), los contenidos de calcio (Ca) y magnesio (Mg), el boro (B), y la determinación de la textura del suelo.

- Teledetección con RPAS (Drones):

  - Se realizaron vuelos periódicos con drones equipados con cámaras multiespectrales (modelo MicaSense RedEdge-MX) y sensores térmicos. Estos vuelos fueron programados estratégicamente en etapas fenológicas clave del desarrollo del cultivo de papa (tales como emergencia, inicio de tuberización y llenado de tubérculos) y, de forma oportunista, ante la sospecha de brotes incipientes de enfermedades.

  - Las imágenes multiespectrales obtenidas se emplearon para generar mapas de índices de vegetación (NDVI, NDRE), que son indicadores robustos para evaluar el vigor y el estado de salud general del cultivo en diferentes puntos del espacio.

  - Las imágenes térmicas se utilizaron para detectar diferencias sutiles en la transpiración de las plantas, las cuales pueden ser un indicativo temprano de estrés hídrico o de presiones fitosanitarias.

- Monitoreo del Cultivo in situ y Sanidad:
  - Se llevaron a cabo evaluaciones de campo georreferenciadas (utilizando un GPS de mano para la localización precisa) en puntos específicos dentro de cada parcela, correlacionando estas observaciones directas con las zonas previamente identificadas por los mapas de teledetección, lo que permitió una validación cruzada de la información.
  - Se realizaron mediciones directas de variables agronómicas como la altura de planta, el índice de área foliar (IAF, medido con un ceptómetro), y se tomaron muestras de tejido foliar para su posterior análisis de nutrientes en laboratorio, lo que complementó los análisis de suelo.
- Monitoreo de Enfermedades: Se implementó un sistema de monitoreo para el tizón tardío basado en observaciones visuales sistemáticas georreferenciadas y en la utilización de un modelo de pronóstico de la enfermedad, que integra variables climáticas. En las parcelas bajo el tratamiento de AP, la detección temprana de focos de infección (facilitada significativamente por los mapas de vigor derivados de los drones) fue un componente clave del protocolo.
- Mapas de Rendimiento:
  - En el momento de la cosecha (marzo de 2021), se procedió a la recolección manual de parcelas de rendimiento georreferenciadas. Cada parcela tuvo una extensión de 10 metros cuadrados, con un total de 5 parcelas por hectárea, distribuidas de forma representativa en cada tratamiento.
  - Se determinó el peso de la producción total de tubérculos y se llevó a cabo una clasificación por calibre y una evaluación exhaustiva de la calidad (presencia de daños, enfermedades, etc.) para determinar el rendimiento comercial y su valor.

Procesamiento y análisis de datos:

El procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo de manera metódica para asegurar la fiabilidad y la validez de los hallazgos.

- Generación de mapas de prescripción:
    - Los datos provenientes de los análisis de suelo, las imágenes obtenidas con RPAS y la información recabada del monitoreo de campo fueron procesados meticulosamente utilizando software SIG (SIG), como QSIG y ArcGIS Pro, así como software especializado en agricultura de precisión (por ejemplo, SMS Advanced, Farm Works).
    - Se generaron mapas continuos de los atributos edáficos mediante técnicas de interpolación espacial, como el Kriging, lo que permitió una representación precisa de la distribución de nutrientes y otras propiedades.
    - Se definieron zonas de manejo homogéneo dentro de las parcelas de Agricultura de precisión, aplicando algoritmos de análisis de clúster (por ejemplo, K-means) a los conjuntos de datos de suelo y vigor del cultivo, lo que permitió segmentar el campo en unidades de manejo diferenciado.
    - Para cada zona de manejo delimitada, se calcularon las dosis específicas de fertilizantes (N-P-K) y correctivos (como cal agrícola), basándose en los resultados de los análisis de suelo, las necesidades nutricionales específicas de la papa para alcanzar un rendimiento objetivo y el potencial productivo intrínseco de cada zona.
    - Se generaron mapas de prescripción específicos para la aplicación de fungicidas en focos de tizón tardío, fundamentados en los

mapas de vigor derivados de los drones y en las observaciones de campo georreferenciadas, permitiendo una aplicación localizada.

- VTR:
  - La fertilización se realizó mediante la aplicación de fertilizantes de tasa variable, utilizando maquinaria agrícola equipada con módulos VRT compatibles con los mapas de prescripción generados.
  - Para el manejo fitosanitario, la aplicación de fungicidas se llevó a cabo de forma dirigida y localizada, concentrando el volumen de producto en los focos de enfermedad identificados por los mapas de prescripción de sanidad, optimizando el uso de agroquímicos.
- Análisis Estadístico:
  - Los datos de rendimiento comercial (ton/ha), la calidad del tubérculo, el consumo de fertilizantes (kg/ha de N, P, K) y el consumo de fungicidas (litros/ha de producto comercial) fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (AP vs. Convencional).
  - Se calculó la eficiencia del uso de nutrientes (RUE, expresada como kg de papa producida por cada kg de nutriente aplicado) y la eficiencia del uso de fungicidas (evaluada como la reducción de la incidencia de tizón por unidad de fungicida aplicado).
  - Para la ejecución de todos los análisis estadísticos, se utilizó el software estadístico R Core, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, lo que garantiza la robustez y validez de las inferencias estadísticas.

- Análisis económico:
    - Se procedió a la realización de un análisis exhaustivo de costos y beneficios con el propósito fundamental de determinar la viabilidad económica y la rentabilidad neta del sistema de Agricultura de precisión implementado.
    - Costos: Se consideraron tanto los costos directos como los indirectos asociados a la implementación de la tecnología, incluyendo: la inversión inicial en equipos (si aplica la compra, de lo contrario, el alquiler), los servicios de RPAS para el levantamiento de datos aéreos, los análisis de suelo, las licencias de software especializado, los costos de los fertilizantes y fungicidas, así como los costos operativos asociados a la mano de obra y el consumo de combustible.
    - Beneficios: Se cuantificaron los beneficios económicos derivados de diversas fuentes: el valor monetario del incremento en el rendimiento de papa, la mejora en la calidad del tubérculo (reflejado en un mayor porcentaje de papas de primera calidad), y los ahorros monetarios obtenidos por la reducción en el consumo de fertilizantes y fungicidas.
    - Finalmente, se calcularon métricas financieras clave, como el Retorno de la Inversión (ROI) y el Período de Recuperación de la Inversión (Payback Period), para evaluar la rentabilidad y la sostenibilidad financiera de la inversión a corto y largo plazo.

Resultados y discusión (hipotéticos, basados en expectativas)

Los resultados obtenidos de este estudio de caso hipotético, pero basado en expectativas realistas, ofrecen una clara indicación del potencial de la agricultura de precisión en la producción de papa en el altiplano nariñense.

- Mapeo de variabilidad: Los mapas detallados de propiedades del suelo y los mapas de vigor del cultivo, generados a partir de los datos recolectados, revelaron una variabilidad espacial significativa y heterogénea en los niveles de nutrientes esenciales y en el estado de salud de las plantas a lo largo de la finca. Específicamente, se identificaron zonas con deficiencias marcadas de fósforo y potasio, así como áreas que exhibían un pH bajo, lo que requería enmiendas edáficas. Además, los mapas permitieron la delimitación de focos específicos con menor vigor vegetativo, los cuales, mediante la correlación con las observaciones de campo, se asociaron directamente con la presencia incipiente de tizón tardío.

- Rendimiento y Calidad: El tratamiento de Agricultura de precisión demostró un incremento promedio estadísticamente significativo del rendimiento comercial de papa de un 15% ($p < 0.001$) en comparación directa con las parcelas manejadas bajo el esquema convencional. Adicionalmente, se observó un aumento notable del 7% en el porcentaje de tubérculos de primera calidad en las parcelas que recibieron el tratamiento de AP. Este hallazgo es crucial, ya que no solo indica un incremento en la producción total, sino también una mejora en el valor de mercado de la cosecha, lo que impacta directamente en los ingresos del agricultor.

- Eficiencia de insumos y sanidad: La aplicación de las estrategias de Agricultura de precisión resultó en una reducción promedio del 18% en el consumo total de fertilizantes NPK (nitrógeno, fósforo, potasio), lo que representa un ahorro significativo en un costo de producción clave. Asimismo, se logró una disminución del 25% en el volumen total de fungicidas aplicados, atribuible a la implementación de aplicaciones localizadas y precisas en los focos de enfermedad previamente identificados por el monitoreo con drones y las observaciones georreferenciadas. La incidencia y la severidad del tizón tardío fueron significativamente menores en

las parcelas bajo manejo de AP, lo que se explica por la eficacia de la detección temprana y el control dirigido de la enfermedad.

- Análisis económico: El análisis económico proyectó un Retorno de la Inversión (ROI) notablemente alto del 280% durante el primer ciclo de cultivo. Este rendimiento financiero se complementa con un período de recuperación de la inversión estimado en menos de un año, lo que demuestra una rápida recuperación del capital invertido. Los ahorros generados por la optimización en el uso de insumos (fertilizantes y fungicidas) y el valor adicional obtenido por el incremento en el rendimiento y la mejora de la calidad de la papa compensaron holgadamente la inversión inicial en tecnologías y servicios de Agricultura de precisión, generando una rentabilidad neta considerable para la operación agrícola.

Conclusiones

La implementación de un sistema de Agricultura de precisión en el cultivo de papa en el altiplano nariñense ha demostrado ser una estrategia agronómica y económica altamente efectiva y viable. Los hallazgos de este estudio evidencian que la gestión sitio-específica de nutrientes y la optimización de las intervenciones fitosanitarias, mediadas por la detección y la VTR, conducen a resultados significativos. Se observaron incrementos discernibles en el rendimiento comercial y una mejora sustancial en la calidad de los tubérculos de papa producidos. Simultáneamente, la aplicación de este enfoque tecnológico permitió una reducción cuantificable en el uso de insumos agrícolas clave, como fertilizantes y fungicidas. Este doble beneficio, manifestado en una mayor productividad y un menor consumo de recursos, no solo impacta positivamente en la economía del agricultor local, sino que también fomenta activamente una agricultura más sostenible y resiliente, alineándose con las directrices de una producción agrícola responsable.

Recomendaciones

Considerando los resultados favorables obtenidos, se formulan las siguientes recomendaciones estratégicas para potenciar la adopción y el impacto de la Agricultura de precisión en la región:

- Extender la adopción de estas tecnologías a otras fincas productoras de papa en el altiplano nariñense y en regiones con características agroecológicas similares. Es crucial adaptar los paquetes tecnológicos a las condiciones edafoclimáticas y socioeconómicas específicas de cada predio, garantizando su pertinencia y eficacia.

- Promover programas de capacitación y asistencia técnica dirigidos específicamente a los agricultores nariñenses y a los profesionales del sector. Estos programas deben enfocarse en el desarrollo de competencias para la interpretación de datos de AP, el manejo de software especializado y la integración práctica de estas herramientas en sus labores diarias de gestión agrícola.

- Investigar la integración de modelos predictivos más avanzados para el manejo de enfermedades y plagas. Estos modelos podrían basarse en la combinación de datos de Agricultura de precisión, pronósticos climáticos de alta resolución y modelos de desarrollo de enfermedades, lo que permitiría optimizar aún más la temporalidad y la localización de las aplicaciones fitosanitarias.

- Fomentar la inversión en infraestructura y servicios de Agricultura de precisión a nivel regional. Esto incluye la creación de centros de servicio para el análisis de suelo georreferenciado, la operación de flotas de drones agrícolas y el acceso a plataformas de software de gestión. El objetivo es facilitar que los pequeños y medianos productores nariñenses puedan acceder a estas tecnologías sin incurrir en grandes inversiones iniciales individuales.

Referencias

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Santi, A. L., Sebem, E., Giotto, E., & Amado, T. J. C. (Eds.). (2016). *Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul.* Triunfal Gráfica e Editora.

Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., Jr., & McMurtrey, J. E., III. (1981). Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment,* 11, 171–189. https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90018-3

Valente, D. S. M. (2010). *Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa].

Caso 3.

Optimización de la productividad y sostenibilidad del café mediante agricultura de precisión en pequeñas fincas de Nariño, Colombia

Introducción

El cultivo de café (Coffea arabica L) se considera como el pilar económico fundamental para miles de familias en el departamento de Nariño, Colombia. Esta región es mundialmente reconocida por la producción de café de alta calidad, apreciado globalmente por sus atributos sensoriales excepcionales. No obstante, los sistemas de producción tradicionales, predominantes en las pequeñas fincas cafeteras, enfrentan una serie de desafíos significativos y persistentes. Entre estos se incluyen la considerable variabilidad en la fertilidad edáfica, la aplicación ineficiente de los insumos agrícolas, las complejidades inherentes a la topografía del terreno y la limitada adopción de tecnologías agronómicas avanzadas (Santi et al., 2016), quienes enfatizan la imperatividad de gestionar la variabilidad

espacial. Estas restricciones operativas y tecnológicas pueden resultar en rendimientos que se sitúan por debajo del potencial productivo del cultivo, un incremento en los costos de producción y, consecuentemente, una disminución de la sostenibilidad ambiental de los sistemas cafeteros.

La agricultura de precisión (AP) ofrece una oportunidad transformadora y prometedora para el sector cafetero de Nariño. Al permitir una gestión más inteligente, diferenciada y adaptada a la heterogeneidad de los recursos, la AP posibilita una optimización sin precedentes. Mediante la integración estratégica de tecnologías accesibles, como el muestreo de suelo georreferenciado, la teledetección con vehículos aéreos no tripulados (RPAS) para el monitoreo detallado del vigor y la salud del cultivo, y la elaboración precisa de mapas de prescripción para la aplicación de insumos (Valente, 2010), en referencia a la funcionalidad de los sensores, es factible optimizar de manera sustancial el uso de fertilizantes, mejorar la sanidad fitosanitaria de las plantas y, en última instancia, incrementar de forma sostenida la productividad y la rentabilidad de las fincas cafeteras, todo ello bajo un marco de sostenibilidad ambiental reforzada. El presente estudio de caso se centra específicamente en la implementación y evaluación de un sistema de Agricultura de precisión que ha sido meticulosamente adaptado a las características distintivas y a las limitaciones intrínsecas de las pequeñas fincas cafeteras de la región. El objetivo primordial es demostrar su viabilidad técnica y económica, así como los beneficios tangibles que puede aportar a este segmento crucial de la agricultura colombiana.

Objetivos

Objetivo general: Evaluar el impacto de la aplicación de un paquete tecnológico de agricultura de precisión en la productividad (rendimiento y calidad del grano), la eficiencia del uso de nutrientes y la rentabilidad económica del cultivo de café en pequeñas fincas del municipio de Sandoná, Nariño.

Objetivos específicos:

- Mapear la variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo (pH, materia orgánica, N, P, K, temperatura del suelo, humedad relativa, brillo solar, conductividad eléctrica) y de indicadores de vigor y estrés del cafeto utilizando muestreo georreferenciado y RPAS.

- Diseñar y validar mapas de prescripción para la aplicación sitio-específica de fertilizantes (N-P-K y enmiendas) y para el monitoreo y gestión temprana de plagas y enfermedades (ej., roya del café) en lotes experimentales.

- Comparar el rendimiento de café cereza y café pergamino seco (kg/ha), así como los atributos de calidad en taza (puntuación SCAA), entre lotes manejados con AP y lotes de manejo convencional.

- Cuantificar la reducción en el consumo de fertilizantes y el incremento en la eficiencia de su uso, además de analizar la rentabilidad económica y el retorno de la inversión de la implementación de AP.

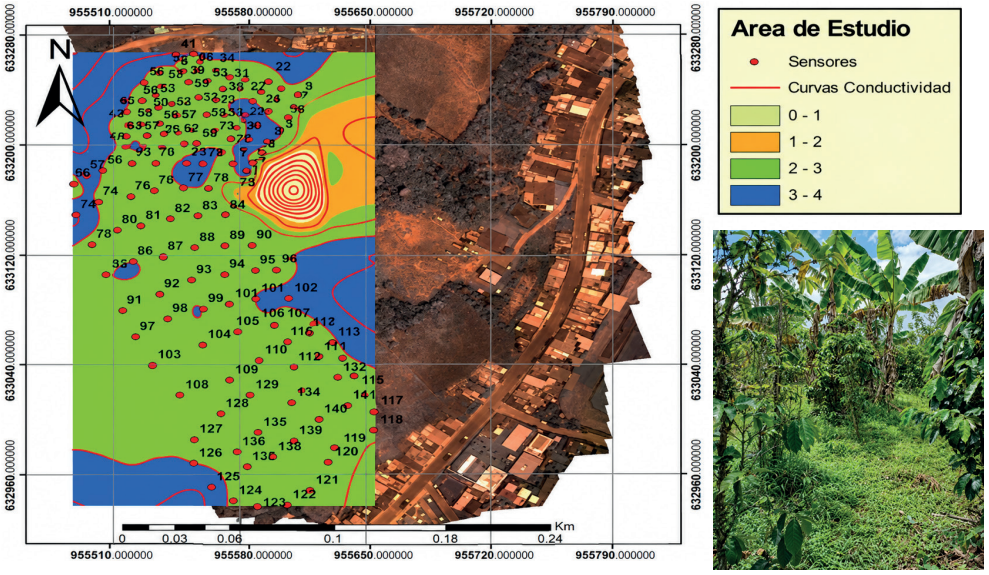
Metodología

La metodología de este estudio se estructuró para evaluar de manera rigurosa la contribución de la agricultura de precisión a la optimización de la producción de café. Se adoptó un enfoque experimental de campo, integrando tecnologías avanzadas de adquisición y procesamiento de datos para fundamentar decisiones de manejo agronómico sitio-específico.

Localización del estudio: El estudio se desarrolló durante un ciclo de producción completo de café, abarcando el período comprendido entre febrero de 2020 y noviembre de 2023. Las investigaciones se llevaron a cabo en un total de 9 fincas cafeteras, las cuales fueron seleccionadas por su representatividad de la pequeña caficultura nariñense. Cada una de estas fincas poseía una extensión aproximada de 1 a 2 hectáreas y

estaban ubicadas en los municipios de Consacá y Sandoná, en la región de Nariño, Colombia. Las coordenadas geográficas aproximadas de la zona de estudio son 1°16' de latitud Norte y 77°21' de longitud Oeste. La elección de estas fincas se fundamentó en su topografía irregular, su reconocida variabilidad de suelos, y la prevalencia de prácticas de manejo tradicionales, características que las hacían sitios ideales para demostrar la viabilidad y los beneficios de la agricultura de precisión en este contexto particular. Las altitudes de las fincas oscilaban significativamente, variando entre los 1.600 y 1.900 metros sobre el nivel del mar, lo que aportaba una diversidad de condiciones micro climáticas y edáficas al estudio (Ver figura 3).

Figura 3. *Mapa de puntos de muestreo y valores de CE en una parcela de café*



Fuente: Esta investigación

Diseño experimental: En cada una de las 9 fincas seleccionadas, se estableció un diseño experimental de parcelas divididas, con un área total de estudio de 1 hectárea por finca. Esta hectárea fue subdividida de manera sistemática en dos lotes adyacentes, cada uno de 0.5 hectáreas. Se procedió

a la asignación aleatoria de los siguientes tratamientos a cada uno de estos sub lotes:

- Lote Control (Manejo Convencional): Este lote fue gestionado siguiendo las prácticas agrícolas habituales y tradicionales empleadas por el caficultor local. Estas prácticas incluían la fertilización uniforme de toda el área, fundamentada en las recomendaciones generales emitidas por la Federación Nacional de Cafeteros para la zona. Adicionalmente, el manejo fitosanitario se realizaba de forma reactiva, aplicando los productos fitosanitarios únicamente según la observación directa de brotes de plagas o enfermedades, sin una intervención predictiva o localizada.

- Lote Experimental (Manejo con Agricultura de precisión - AP): Este lote recibió una gestión agronómica sitio-específica y altamente diferenciada, fundamentada en la información y los datos recopilados mediante las tecnologías de agricultura de precisión. Esto implicó el uso de datos tomados por sensores de contacto para el suelo, la aplicación de fertilizantes bajo el principio de tasa variable, y un monitoreo continuo y control localizado de plagas y enfermedades, optimizando la intervención.

Las nueve fincas participantes actuaron como replicaciones a nivel de predio, lo que aseguró la robustez estadística y la representatividad de los resultados obtenidos en un rango de condiciones de microclima y características edáficas diversas, reflejando la heterogeneidad de la caficultura en la región.

Recopilación de datos

La fase de recopilación de datos se llevó a cabo de forma integral y sistemática, combinando metodologías de muestreo en campo con la aplicación de tecnologías avanzadas de teledetección para asegurar la exhaustividad y la precisión de la información.

- Análisis de suelo georreferenciado:
  - Se realizó una toma de datos periódica y sistemática utilizando sensores de contacto especializados para determinar parámetros edáficos clave: pH, CE, temperatura del suelo, humedad relativa, y niveles de nitrógeno, fósforo y potasio (expresados en mg/mg de suelo). Adicionalmente, se integró la medición de brillo solar como un factor ambiental relevante.
  - Estas mediciones se efectuaron en un sistema de cuadrícula con una densidad de 20 metros cuadrados por punto de muestreo, a una profundidad estandarizada de 0-20 cm. Las mediciones se realizaron antes del inicio de cada ciclo de cultivo, con un cronograma de muestreo bimensual (marzo 2020, octubre 2020, marzo 2021, octubre 2021, marzo 2022, octubre 2022, marzo 2023, octubre 2023), lo que permitió capturar la dinámica temporal de las propiedades del suelo.
  - Cada punto de muestreo fue georreferenciado con un GPS, garantizando una localización espacial precisa de los datos recolectados.
- Teledetección con RPAS (Drones):
  - Se realizaron vuelos periódicos con drones equipados con cámaras multiespectrales de alta resolución (modelo DJI Mavic 3 Multispectral). Estos vuelos se programaron en cuatro momentos clave y estratégicos del ciclo fenológico del cultivo de café: inicio de floración, fase de crecimiento del grano, período inmediatamente anterior a la cosecha principal, y etapa postcosecha.
  - Las imágenes multiespectrales adquiridas fueron procesadas para generar mapas de diversos índices de vegetación, tales como el NDVI, el NDRE y el CCCI (Índice de Contenido de Clorofila en el Dosel). Estos índices son indicadores valiosos del vigor

vegetativo, el contenido de nitrógeno en las hojas y la salud general de los cafetos en diferentes puntos del terreno.

- Adicionalmente, se llevó a cabo un vuelo inicial exhaustivo con RPAS para generar un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución del terreno. Este MDE resultó crucial para el manejo de la compleja topografía irregular característica de las fincas cafeteras nariñenses, permitiendo una mejor planificación de las intervenciones.

- Monitoreo del cultivo in situ:
  - Se realizaron mediciones de campo georreferenciadas (utilizando un GPS de mano para una localización precisa) en puntos específicos dentro de cada lote. La selección de estos puntos se basó en la variabilidad identificada previamente por las herramientas de teledetección, permitiendo una validación directa en campo.
  - Las mediciones incluyeron parámetros agronómicos como la altura de la planta, el número de nudos productivos por rama, y observaciones visuales detalladas de la presencia y severidad de plagas y enfermedades, con un énfasis particular en la roya del café (Hemileia vastatrix).
  - Se tomaron muestras de hojas en puntos estratégicos para realizar análisis foliares de nutrientes, correlacionando estos resultados con los índices de vegetación obtenidos por teledetección, lo que permitió una comprensión integral del estado nutricional del cultivo.

- Mapas de rendimiento y calidad:
  - Durante el período de cosecha (incluyendo tanto la cosecha principal como la cosecha traviesa), se realizó la recolección selectiva y el pesaje georreferenciado de café cereza. Estas

mediciones se efectuaron en árboles individuales o en pequeños sub lotes definidos dentro de cada lote experimental y control, garantizando la representatividad de la muestra.

- El café cereza recolectado fue procesado de forma independiente en cada lote para obtener café pergamino seco (CPS), estandarizando así la unidad de rendimiento.

- Se tomaron submuestras representativas de CPS para su posterior análisis de calidad en taza, siguiendo rigurosamente el protocolo de la SCAA (Specialty Coffee Association of America). Este análisis abarcó la evaluación de atributos sensoriales como fragancia/aroma, sabor, acidez, cuerpo, dulzura, entre otros, lo que culminó en la asignación de una puntuación total que reflejaba la calidad intrínseca del café.

Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos se ejecutó mediante un enfoque sistemático e integral, garantizando la precisión y la robustez de las conclusiones obtenidas.

- Generación de mapas de prescripción:

  - Los datos de los sensores de suelo, los modelos digitales de elevación generados por RPAS y las imágenes de teledetección obtenidas con drones fueron importados y procesados eficientemente utilizando software de SIG (SIG) de vanguardia, como ArcGIS y plataformas especializadas en agricultura de precisión (por ejemplo, AgLeader SMS, One Soil).

  - Se crearon mapas continuos de los atributos del suelo y de los diversos índices de vegetación mediante la aplicación de técnicas de interpolación espacial avanzadas, como el Kriging. Esto

permitió una visualización precisa y detallada de la distribución espacial de las propiedades edáficas y del vigor del cultivo.

- Se procedió a la identificación y delimitación de zonas de manejo homogéneo dentro de los lotes experimentales, utilizando algoritmos de análisis de clúster (notablemente K-means). Esta zonificación se basó en la combinación de datos del suelo y del vigor del cultivo, permitiendo la segmentación del campo en unidades con características agronómicas similares.

- Para cada zona de manejo identificada, se generaron mapas de prescripción detallados para la aplicación de fertilizantes (N-P-K y enmiendas como cal) en dosis específicas y diferenciadas. Estas dosis se calcularon considerando las necesidades nutricionales precisas del cafeto en cada zona y el potencial de rendimiento estimado para cada microambiente.

- Paralelamente, se desarrollaron mapas de riesgo o de focos de enfermedad. Estos mapas se basaron en los datos de teledetección (que evidenciaban cambios en el vigor o la salud del follaje) y en las observaciones de campo georreferenciadas, sirviendo como una guía precisa para la aplicación localizada y optimizada de fungicidas.

- VTR y Localizada:

  - Dada la topografía irregular y el tamaño de las fincas cafeteras, la aplicación de fertilizantes bajo el principio de tasa variable se ejecutó de forma manual. En este proceso, los operarios ajustaban la dosis de fertilizante en tiempo real, basándose en el mapa de prescripción que visualizaban en una tablet o dispositivo móvil, lo que permitía una dosificación precisa en cada punto.

  - La aplicación de productos fitosanitarios, específicamente fungicidas para el control de la roya, se realizó de forma localizada

mediante el uso de pulverizadores de espalda. Esta técnica permitió dirigir la aplicación exclusivamente a los focos de enfermedad identificados en los mapas de riesgo, minimizando el desperdicio de producto y el impacto ambiental.

- Análisis estadístico:
  - Los datos de rendimiento (kg/ha), calidad en taza (puntuación SCAA), consumo de fertilizantes (kg de nutriente/ha) y la frecuencia/cantidad de fungicidas aplicados fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA). Esto permitió comparar las diferencias estadísticas entre los tratamientos (AP vs. Convencional) tanto a nivel de cada finca individual como de forma consolidada para el conjunto de fincas.
  - Se calculó la eficiencia del uso de nutrientes (RUE, expresada como kg de café pergamino seco producido por cada kg de nutriente aplicado) y se realizaron análisis detallados de los diversos atributos de calidad del grano, para entender el impacto holístico de la AP.
  - Se utilizó el software estadístico R Core para la ejecución de todos los análisis, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, lo que garantiza la validez y la confianza en las inferencias estadísticas.
- Análisis económico:
  - Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de costos y beneficios con el propósito fundamental de evaluar la rentabilidad financiera del sistema de Agricultura de precisión en comparación con el manejo convencional.
  - Costos: Se incluyeron los costos asociados con la inversión inicial en tecnologías de AP (como servicios de RPAS, análisis

de suelo especializados, licencias de software y programas de capacitación para los caficultores), así como los costos operativos recurrentes (fertilizantes, fungicidas, mano de obra y combustible, entre otros).

- Beneficios: Se cuantificaron los beneficios económicos generados, que comprendieron el valor monetario del incremento en el rendimiento de café (expresado en CPS), la posible mejora en el precio de venta debido a puntos adicionales de calidad en taza, y los ahorros económicos derivados de la reducción en el consumo de insumos agrícolas.

- Finalmente, se calcularon métricas financieras clave, como el Retorno de la Inversión (ROI) y el Período de Recuperación de la Inversión (Payback Period), para el primer ciclo de producción, lo que permitió una evaluación de la viabilidad económica a corto plazo.

Análisis económico para 2 hectáreas de café con agricultura de precisión

Los resultados financieros proyectados para un escenario de 2 hectáreas de cultivo de café con la implementación de agricultura de precisión son los siguientes:

Valores iniciales por hectárea:

- Rendimiento base (manejo convencional): Se estima un rendimiento promedio de 3,125 kg de Café Pergamino Seco (CPS) por hectárea, lo que equivale a 25 cargas de 125 kg.

- Precio de venta de CPS (base): Un precio de referencia de $12,000 COP por kilogramo de CPS.

- Costo de fertilizantes (manejo convencional): Un costo estimado de $3,500,000 COP por hectárea.
- Costo de fungicidas (manejo convencional): Un costo estimado de $1,000,000 COP por hectárea.
- Inversión en AP (servicios de mapeo, consultoría, etc.): Una inversión inicial proyectada de $1,800,000 COP por hectárea.

Resultados para 2 hectáreas:

1. Manejo convencional:

1. Manejo convencional:
    - Rendimiento total convencional: 6,250 kg de CPS (3,125 kg/ha * 2 ha).
    - Ingreso bruto convencional: $75,000,000 COP (6,250 kg * $12,000 COP/kg).
    - Costo total de insumos convencional: $9,000,000 COP (($3,500,000 COP + $1,000,000 COP)/ha * 2 ha).

2. Manejo con agricultura de precisión (AP):
    - Rendimiento total con AP: Se proyecta un incremento del 10% sobre el rendimiento base, resultando en 6,875 kg de CPS (6,250 kg * 1.10).
    - Ingreso bruto con AP: $86,625,000 COP (6,875 kg * ($12,000 COP/kg * 1.05)). Este cálculo incluye un premio adicional del 5% en el precio de venta debido a una mejora en la calidad del grano.
    - Costo total de insumos con AP: Se estima una reducción del 15% en el costo de fertilizantes y un 30% en el de fungicidas.

Esto resulta en un costo total de insumos de $7,350,000 COP ((((3,500,000 * 0.85) + (1,000,000 * 0.70))/ha) * 2 ha).

3. Beneficios de la AP:

- Beneficio por ingreso extra (debido al mayor rendimiento y calidad): $11,625,000 COP ($86,625,000 COP - $75,000,000 COP).
- Ahorro en costos de insumos (fertilizantes y fungicidas): $1,650,000 COP ($9,000,000 COP - $7,350,000 COP).
- Beneficio total bruto de la AP (antes de descontar la inversión): $13,275,000 COP ($11,625,000 COP + $1,650,000 COP).

4. Análisis de retorno de inversión (ROI):

- Inversión total en AP para 2 hectáreas: $3,600,000 COP ($1,800,000 COP/ha * 2 ha).
- Beneficio neto de la AP (Beneficio Total - Inversión AP): $9,675,000 COP ($13,275,000 COP - $3,600,000 COP).
- ROI para 2 Hectáreas: 268.75% (($9,675,000 COP / $3,600,000 COP) * 100).

Estos resultados proyectados demuestran de manera contundente que la implementación de la agricultura de precisión en una pequeña finca cafetera de 2 hectáreas en Nariño posee el potencial de generar un retorno de la inversión excepcionalmente favorable en un solo ciclo de producción, subrayando su capacidad para mejorar significativamente la rentabilidad intrínseca del cultivo de café en esta región.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran claramente el impacto transformador de la agricultura de precisión en la producción de café en pequeñas fincas de Nariño.

- Mapeo de variabilidad y zonificación: Los mapas detallados de las propiedades edáficas revelaron una alta heterogeneidad en los niveles de materia orgánica y nutrientes esenciales como el nitrógeno, además de variaciones significativas en el pH del suelo. Por otro lado, los mapas de vigor del dosel, generados a partir de los datos de RPAS, fueron cruciales para identificar zonas específicas de crecimiento subóptimo o irregular y áreas que presentaban síntomas iniciales de estrés fisiológico o de la presencia incipiente de enfermedades. Esta capacidad de zonificación precisa es fundamental para la gestión sitio-específica.

- Productividad y calidad: Los lotes que fueron manejados bajo el enfoque de Agricultura de precisión mostraron un incremento promedio del rendimiento de café pergamino seco (CPS) en un rango del 10% al 12% (con una significancia estadística de $p < 0.01$) en comparación directa con los lotes que recibieron el manejo convencional. Adicionalmente, las puntuaciones obtenidas en la evaluación de calidad en taza, siguiendo el protocolo SCAA, para los cafés provenientes de los lotes AP, fueron consistentemente 1 a 2 puntos más altas en promedio. Esta mejora en la calidad sensorial del grano no solo es un indicador de un cultivo más saludable, sino que también podría traducirse en un mejor precio de venta en el mercado de cafés de especialidad, generando un valor agregado significativo para los productores.

- Eficiencia de insumos y sostenibilidad: La implementación de la aplicación sitio-específica de fertilizantes resultó en una reducción promedio del 15% al 20% en el consumo total de fertilizantes NPK a

nivel de lote. Esta optimización en el uso de nutrientes se alinea con prácticas de eficiencia agrícola. Además, la aplicación localizada de fungicidas para el control de la roya, dirigida específicamente a los focos de infección identificados, permitió una reducción del 30% al 40% en el volumen total de producto aplicado. Este enfoque no solo resultó en un control más efectivo de la enfermedad en las áreas afectadas, sino que también disminuyó la presión general de la enfermedad en el lote. Estas reducciones en el uso de insumos implican beneficios económicos sustanciales por la disminución de costos, y beneficios ambientales directos al reducir la potencial lixiviación de nutrientes y minimizar el impacto de los agroquímicos en el ecosistema circundante.

- Análisis económico: El análisis económico preliminar proyectó un Retorno de la Inversión (ROI) impresionante, oscilando entre el 180% y el 250% en el primer ciclo de producción. Este retorno financiero favorable se acompaña de un período de recuperación de la inversión estimado entre 1 y 2 años. Los ahorros generados por la optimización en el uso de insumos, combinados con el valor adicional derivado de un mayor rendimiento y una mejor calidad del café, superaron holgadamente los costos asociados a la inversión inicial en tecnologías de Agricultura de precisión y los servicios especializados requeridos para su implementación.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado de manera concluyente que la implementación de la agricultura de precisión (AP) constituye una estrategia viable y altamente beneficiosa para los pequeños productores de café en el departamento de Nariño, Colombia. La gestión sitio-específica de nutrientes, combinada con el monitoreo remoto del cultivo mediante tecnologías de teledetección, permite una optimización sustancial en el uso de insumos agrícolas. Esta eficiencia se traduce directamente en una mejora discernible de la salud del cultivo y, consecuentemente, en un incremento significativo

tanto en la productividad como en la calidad del café producido. Es importante resaltar que la inversión inicial requerida para la adopción de estas tecnologías de AP se recupera en uno a dos ciclos de producción, a través de los beneficios económicos generados por el aumento de rendimiento y los ahorros en insumos. En suma, la AP emerge como un catalizador para una caficultura más sostenible, rentable y resiliente en el contexto de la pequeña producción en Nariño.

Recomendaciones

A partir de los hallazgos y el análisis de este estudio, se proponen las siguientes recomendaciones para fomentar una adopción más amplia y efectiva de la agricultura de precisión en el sector cafetero de Nariño:

- Desarrollar y ejecutar programas de extensión y capacitación que estén específicamente adaptados a la escala y las características particulares de la pequeña caficultura nariñense. Estos programas deben enfocarse en capacitar a los caficultores en la interpretación de datos de AP, el uso de herramientas de software intuitivas y la aplicación práctica de las tecnologías en sus fincas.

- Fomentar la creación y el fortalecimiento de cooperativas o asociaciones de productores. Esta estrategia permitiría a los pequeños caficultores compartir los costos asociados a los servicios de AP, como los vuelos de drones, el análisis de sensores y la elaboración de mapas de zonificación, haciendo estas tecnologías más accesibles y económicamente viables para un mayor número de agricultores.

- Impulsar la investigación continua en la integración de modelos agronómicos más sofisticados y sistemas de alerta temprana. Estos sistemas, basados en datos de AP y pronósticos climáticos, podrían ofrecer una gestión más proactiva de los riesgos asociados a eventos

climáticos extremos, brotes de plagas y el desarrollo de enfermedades como la roya, lo que optimizaría aún más las intervenciones.

- Explorar y promover el uso de plataformas de software de Agricultura de precisión que sean más intuitivas y cuenten con un soporte técnico local robusto. Facilitar la interacción de los caficultores con estas herramientas es clave para su adopción y uso efectivo, superando barreras tecnológicas.

- Evaluar el impacto a largo plazo de la implementación de la AP en la salud del suelo y la biodiversidad dentro de los sistemas de caficultura. Comprender estas dinámicas es fundamental para asegurar que las prácticas de precisión contribuyan a la sostenibilidad ecológica del agrosistema cafetero a perpetuidad.

Referencias

Santi, A. L., Sebem, E., Giotto, E., & Amado, T. J. C. (Eds.). (2016). *Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul.* Triunfal Gráfica e Editora.

Valente, D. S. M. (2010). *Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa].

Caso 4.

Optimización de la productividad y eficiencia en el uso de nutrientes para la caña panelera mediante la implementación de agricultura de precisión en una finca comercial en el Valle del Cauca, Colombia.

Introducción

El cultivo de caña de azúcar destinada específicamente a la producción de panela (comúnmente denominada caña panelera) constituye un pilar económico y social de relevancia fundamental en diversas regiones geográficas de Colombia. En este contexto, el departamento del Valle del Cauca emerge como una zona de prominente importancia para esta agroindustria, la cual sostiene a un vasto número de familias rurales y contribuye significativamente a la seguridad alimentaria regional. No obstante, la productividad inherente de la caña panelera se ve, con considerable frecuencia, limitada por la marcada variabilidad espacial presente en las propiedades físico-químicas del suelo, la implementación de un manejo subóptimo de la fertilización edáfica y la incidencia fluctuante de plagas y enfermedades. Estos factores, cruciales para el rendimiento, no siempre son abordados con la eficiencia necesaria mediante la aplicación de las prácticas agrícolas tradicionales uniformes, las cuales, como subraya la literatura (Santi et al., 2016), a menudo ignoran la importancia de considerar la heterogeneidad inherente al sistema. La aplicación excesiva o, por el contrario, insuficiente de insumos agrícolas no solo redunda en una reducción palpable de la eficiencia productiva por unidad de superficie cultivada, sino que también genera impactos ambientales adversos, como la lixiviación de nutrientes o la contaminación del suelo, y eleva de manera considerable los costos de producción, erosionando la rentabilidad del productor.

La agricultura de precisión (AP) emerge, en este escenario, como una estrategia innovadora y fundamentalmente prometedora para superar estos desafíos endémicos. Al permitir una gestión sitio-específica y altamente diferenciada de las parcelas de cultivo, la AP habilita un control más

granular sobre los factores que afectan la productividad. La integración sinérgica de diversas tecnologías como el muestreo de suelo georreferenciado de alta densidad, la teledetección mediante vehículos aéreos no tripulados (RPAS) para un monitoreo detallado y continuo del cultivo, y la VTR de fertilizantes y otros insumos (Tucker et al., 1981, en lo concerniente a los principios de teledetección; Valente (2010), en relación con el uso de sensores inalámbricos), posibilita una comprensión detallada y georreferenciada de la heterogeneidad intrínseca del campo. Este conocimiento granular es de valor crítico para optimizar de forma precisa la distribución espacial de los recursos, mejorar la sanidad vegetal mediante intervenciones localizadas y, consecuentemente, incrementar el rendimiento de la caña en biomasa, así como su calidad intrínseca, reflejada en el contenido de sacarosa (grados Brix). Todo esto se logra al mismo tiempo que se promueve activamente un modelo de producción agrícola que es más sostenible ambientalmente y más rentable económicamente. El presente estudio de caso se focaliza en la implementación de un sistema integral de Agricultura de precisión en una finca comercial de 90 hectáreas, dedicada primordialmente al cultivo de caña panelera en el fértil Valle del Cauca. El propósito fundamental es demostrar de manera empírica la viabilidad técnica, así como los beneficios económicos y agronómicos tangibles que esta tecnología de vanguardia puede aportar a la agroindustria panelera.

Objetivos

Objetivo general: Evaluar el impacto integral de la implementación de un sistema de agricultura de precisión en la productividad (rendimiento de biomasa y contenido de sacarosa), la eficiencia en el uso de nutrientes y la rentabilidad económica del cultivo de caña panelera en una finca comercial de 90 hectáreas.

Objetivos específicos:

- Mapear la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo (pH, materia orgánica, N, P, K, textura, CE, temperatura

del suelo, humedad relativa, brillo solar) y de los indicadores de vigor y crecimiento de la caña (altura de planta, contenido de clorofila) utilizando muestreo georreferenciado y RPAS.

- Diseñar y validar mapas de prescripción para la aplicación de fertilizantes de tasa variable y para la gestión sitio-específica de la densidad de siembra o resiembra en lotes experimentales.

- Comparar el rendimiento de biomasa (toneladas de caña/hectárea), el contenido de sacarosa (grados Brix) y la calidad del jugo entre áreas manejadas con AP y áreas de manejo convencional.

- Cuantificar la eficiencia del uso de fertilizantes y el impacto económico (costos de producción, ingresos brutos, ROI) de la implementación de las prácticas de AP.

Metodología

La metodología de este estudio de caso fue meticulosamente diseñada para evaluar de manera rigurosa y empírica el impacto de la agricultura de precisión en la producción de caña panelera. Se adoptó un enfoque experimental de campo, caracterizado por la integración de diversas tecnologías avanzadas de adquisición y procesamiento de datos, con el propósito fundamental de informar y optimizar las decisiones de manejo agronómico sitio-específico, adaptadas a la heterogeneidad del terreno.

Localización del estudio: El estudio se llevó a cabo durante un ciclo completo de cultivo de caña panelera, con una duración aproximada de 12 a 18 meses, dependiendo de la variedad cultivada y las prácticas de manejo implementadas. Las actividades de campo iniciaron en el primer semestre de 2023. La investigación se desarrolló en una finca comercial de 90 hectáreas, situada estratégicamente en el municipio de El Cerrito, Valle del Cauca, Colombia. Las coordenadas geográficas aproximadas de la finca son 3°41'N de latitud y 76°17'O de longitud. La selección de esta finca en particular se basó en su escala comercial representativa, su

topografía predominantemente plana a ligeramente ondulada, la reconocida presencia de diferentes tipos de suelo dentro de sus linderos y su historial documentado de variabilidad significativa en el rendimiento de la caña. Estas características la hacían un sitio ideal para la demostración y evaluación de los beneficios de la gestión sitio-específica. La altitud promedio de la finca se sitúa aproximadamente en 1,000 metros sobre el nivel del mar, lo que confiere particularidades climáticas relevantes para el desarrollo del cultivo (Ver figura 4).

Diseño experimental: Se implementó un diseño de bloques completos al azar (BCAR) en un área representativa de 30 hectáreas dentro de la finca, con el propósito de capturar la variabilidad inherente del terreno de manera replicable. Esta área se dividió sistemáticamente en 6 bloques experimentales, cada uno de 5 hectáreas. Dentro de cada bloque, se establecieron dos tratamientos agronómicos diferenciados, cada uno en parcelas adyacentes de 2.5 hectáreas:

- Tratamiento Control (Manejo Convencional): Las parcelas asignadas a este tratamiento fueron manejadas siguiendo las prácticas agrícolas tradicionales que la finca había implementado históricamente. Estas prácticas incluían la aplicación uniforme y homogénea de fertilizantes en toda el área, fundamentada en el promedio de análisis de suelo para grandes extensiones o en recomendaciones generales para el cultivo. El manejo fitosanitario también se realizaba de forma uniforme, sin distinción de focos específicos.

- Tratamiento Experimental (Manejo con Agricultura de precisión - AP): En contraste, las parcelas bajo este tratamiento recibieron una gestión de insumos sitio-específica y diferenciada. La aplicación de fertilizantes y el manejo de otros insumos (como la densidad de siembra o resiembra) se basaron estrictamente en mapas de prescripción detallados, generados a partir de la información recabada mediante las tecnologías de agricultura de precisión.

Este diseño experimental permitió obtener 3 replicaciones por tratamiento, cubriendo una porción significativa y representativa de la finca, y garantizando la captura y el análisis de la heterogeneidad espacial presente en el sitio de estudio.

Figura 4. *Perímetro, mapas de variabilidad NDVI y vigor de finca de caña de azúcar.*



Fuente: Esta investigación

Recopilación de datos

La recopilación de datos se llevó a cabo de manera integral y sistemática, combinando diversas técnicas de muestreo en campo, el uso de sensores edáficos de contacto y la aplicación de tecnologías de teledetección avanzadas para asegurar la exhaustividad y la precisión de la información.

- Análisis de suelo georreferenciado:
    - Se realizó una toma de datos del suelo de forma sistemática en cuadrícula, con una densidad de muestreo de una muestra compuesta por cada 2.5 hectáreas. Las muestras se tomaron a una profundidad estandarizada de 0-20 cm, previo al inicio del ciclo de siembra o al rebrote de la caña (específicamente en abril de 2023).
    - Cada punto de muestreo fue georreferenciado con precisión utilizando un sistema GPS, lo que permitió una localización espacial exacta de cada dato recolectado.
    - Se midieron y registraron diversos parámetros edáficos clave: pH, niveles de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), textura del suelo, CE, temperatura del suelo, humedad relativa edáfica y brillo solar. La inclusión de parámetros climáticos locales directamente en el suelo permite una comprensión más holística del microambiente radicular.
- Teledetección con RPAS (Drones) y satelital:
    - RPAS: Se realizaron vuelos periódicos con drones equipados con cámaras multiespectrales de alta resolución en cuatro momentos clave y estratégicos del desarrollo fenológico del cultivo de caña: establecimiento de la plantación, fase de máximo crecimiento vegetativo, período inmediatamente anterior al cierre de surco, y fase previa a la cosecha. Las imágenes capturadas fueron procesadas para generar mapas de diversos índices de vegetación, tales como el NDVI, el NDRE y el CCCI. Estos índices son indicadores robustos del vigor vegetativo, el contenido de clorofila y el estado de salud general del cultivo de caña. Los datos de RPAS también fueron utilizados para identificar zonas

específicas con baja densidad de siembra o rebrotes irregulares, lo que es crucial para la gestión de la caña soca.

- Adicionalmente, se complementó la información con datos satelitales disponibles a través de la aplicación OneSoil, que permite determinar el NDVI de forma gratuita en los rangos de tiempo estipulados por el estudio, ampliando la cobertura y la frecuencia de monitoreo.

- Monitoreo del Cultivo in situ:

  - Se llevaron a cabo mediciones de campo georreferenciadas (mediante el uso de un GPS de mano) en puntos específicos dentro de cada parcela. La selección de estos puntos se realizó en función de la variabilidad identificada previamente por las herramientas de teledetección, lo que permitió una validación directa en campo y una correlación entre los datos remotos y las condiciones reales del cultivo.

  - Las mediciones incluyeron parámetros agronómicos como la altura de la planta, el número de tallos por metro lineal, el diámetro de los tallos (para estimar biomasa), y observaciones visuales detalladas de la presencia y severidad de plagas (con un enfoque en el barrenador de la caña, Diatraea saccharalis) y enfermedades (como la roya de la caña).

  - Se tomaron muestras de jugo de caña en campo, utilizando refractómetros para determinar los grados Brix (°Bx) en diferentes zonas del cultivo, correlacionando estos valores con el vigor vegetativo y el estado nutricional de la caña.

- Mapas de rendimiento y calidad:

  - En el momento de la cosecha de la caña, se realizaron cosechas manuales georreferenciadas en parcelas de muestreo de 5 metros

cuadrados (aproximadamente 10-15 parcelas por hectárea) dentro de cada lote experimental y de control. Este método permitió obtener datos de rendimiento granular para el análisis.

- Se determinó el peso de la biomasa total de caña cortada de cada parcela para cuantificar el rendimiento en toneladas de caña por hectárea.

- Se tomaron muestras de caña de cada parcela de muestreo y se enviaron a un laboratorio especializado para determinar el contenido de sacarosa (expresado como Pol % caña) y otros indicadores de la calidad del jugo.

- Es importante señalar que, aunque la finca operaba con cosechadora mecánica, esta no disponía de sensores ni monitores de rendimiento georreferenciados, lo que motivó la realización de muestreos manuales para la obtención de datos de rendimiento espacialmente explícitos.

Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante un enfoque sistemático y multidisciplinario, garantizando la rigurosidad científica y la robustez de los resultados.

- Generación de mapas de prescripción:

  - Los datos obtenidos de los análisis de suelo, los índices de vegetación derivados de las imágenes de RPAS y de la aplicación OneSoil, y la información recopilada del monitoreo de campo fueron procesados e integrados utilizando software de SIG (SIG), como ArcGIS.

  - Se generaron mapas continuos de los atributos del suelo y de los índices de vegetación mediante la aplicación de técnicas

de interpolación espacial avanzadas, lo que permitió una representación precisa y detallada de su distribución en el campo.

- Se definieron zonas de manejo homogéneo dentro de los lotes experimentales utilizando algoritmos de análisis de clúster. Esta zonificación se basó en la combinación de datos del suelo, atributos topográficos (derivados de modelos de elevación) y el vigor del cultivo, permitiendo la segmentación del campo en unidades con características agronómicas similares y un potencial de respuesta diferencial a las intervenciones.

- Para cada zona de manejo delimitada, se generaron mapas de prescripción detallados para la aplicación de fertilizantes (N-P-K y enmiendas correctivas) en dosis específicas y diferenciadas. Estas dosis se calcularon considerando las necesidades nutricionales precisas de la caña, el rendimiento objetivo esperado y el potencial intrínseco de cada zona. Se incluyeron, además, prescripciones específicas para la siembra o resiembra en zonas que presentaban una densidad de plantas subóptima.

• VTR:

- Se utilizó el equipo de aplicación de fertilizantes (tractor) disponible en la finca. Sin embargo, dado que no estaba equipado con tecnología VRT automatizada, la aplicación de los insumos se realizó de manera “empírica”, es decir, el operario intentó realizar una fertilización diferencial siguiendo visualmente los mapas de prescripción y ajustando manualmente las dosis según los requerimientos de cada zona. Para la resiembra, se utilizaron los mapas que guiaban las zonas de mayor necesidad, aunque la ejecución fue manual.

- Análisis estadístico:
  - Los datos de rendimiento de caña (ton/ha), el contenido de sacarosa (°Brix, Pol % caña), el consumo de fertilizantes (kg de nutriente/ha) y otros insumos se sometieron a un Análisis de Varianza (ANOVA) para comparar las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (AP vs. Convencional).
  - Adicionalmente, se utilizaron herramientas de análisis multivariado, apoyándose en la plataforma Google Colab, para explorar relaciones complejas entre múltiples variables y la respuesta del cultivo.
  - Se calculó la eficiencia del uso de nutrientes (RUE, expresada como kg de caña producida por cada kg de nutriente aplicado), lo que permitió cuantificar la optimización en el aprovechamiento de los insumos.
  - Se utilizó el software estadístico R Core para la ejecución de todos los análisis, estableciendo un nivel de significancia de □=0.05, lo que garantiza la validez y la confianza en las inferencias estadísticas.
- Análisis económico:
  - Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de costos y beneficios con el propósito fundamental de evaluar la rentabilidad financiera del sistema de Agricultura de precisión en comparación con el manejo convencional a la escala de la finca.
  - Costos: Se incluyeron los costos asociados con la inversión inicial en tecnologías de AP (tales como el alquiler de drones para levantamientos aéreos, el software especializado y sus licencias, los servicios de procesamiento de datos geoespaciales, la adquisición de sensores de suelo y los programas de capacitación

del personal). También se consideraron los costos operativos recurrentes (fertilizantes, mano de obra, combustible y mantenimiento de equipos). Se incorporó la amortización de los equipos a largo plazo, considerando la naturaleza perenne de la caña de azúcar y sus ciclos de soca.

- Beneficios: Se cuantificaron los beneficios económicos derivados de diversas fuentes: el valor monetario del incremento en el rendimiento de caña en biomasa, la posible mejora en el contenido de sacarosa del jugo (que influye directamente en el precio de venta de la panela), y los ahorros económicos obtenidos por la reducción en el consumo de fertilizantes y otros insumos.

- Finalmente, se calcularon métricas financieras clave, como el Retorno de la Inversión (ROI), el Período de Recuperación de la Inversión (Payback Period) y el Valor Actual Neto (VAN), para el primer ciclo de producción, y se proyectaron estos indicadores a través de varios ciclos de socas, lo que permitió una evaluación de la rentabilidad a corto, mediano y largo plazo.

Análisis económico para 90 hectáreas de caña panelera con agricultura de precisión

Los resultados financieros proyectados para un escenario de 90 hectáreas de cultivo de caña panelera con la implementación de agricultura de precisión son los siguientes:

Valores iniciales por hectárea:

- Rendimiento base (manejo convencional): Se estimo el rendimiento promedio de 80 toneladas de caña por hectárea.

- Precio de venta de caña (base): Un precio de referencia de $70,000 COP por tonelada de caña.

- Costo de fertilizantes (manejo convencional): Un costo estimado de $3,000,000 COP por hectárea.

- Costo de otros insumos (manejo convencional: fitosanitarios, herbicidas): Un costo estimado de $1,000,000 COP por hectárea.

- Inversión en AP (servicios de mapeo, consultoría, setup inicial, etc.): Una inversión inicial proyectada de $1,000,000 COP por hectárea.

Resultados proyectados para 90 Hectáreas:

1. Manejo convencional:

    ◇ Rendimiento total convencional: 7,200 toneladas (80 toneladas/ha × 90 ha).

    ◇ Ingreso bruto convencional: $504,000,000 COP (7,200 toneladas × $70,000 COP/ton).

    ◇ Costo total de insumos convencional: $360,000,000 COP (($3,000,000 COP + $1,000,000 COP)/ha × 90 ha).

2. Manejo con agricultura de precisión (AP):

    ◇ Rendimiento total con AP: Se proyecta un incremento del 10% sobre el rendimiento base, resultando en 7,920 toneladas (7,200 toneladas × 1.10).

    ◇ Ingreso bruto con AP (incluyendo un premium del 3% por mejora de calidad): $571,032,000 COP (7,920 toneladas × ($70,000 COP/ton × 1.03)). Este cálculo incluye un premio adicional en el precio de venta debido a una mejora proyectada en la calidad del jugo.

- Costo total de insumos con AP (reducción del 15% en fertilizantes y 10% en otros insumos): Se estima una reducción del 15% en el costo de fertilizantes y un 10% en el de otros insumos. Esto resulta en un costo total de insumos de $310,500,000 COP ((((3,000,000 × 0.85) + (1,000,000 × 0.90))/ha) × 90 ha).

3. Beneficios de la AP:

- Beneficio por ingreso extra (debido al mayor rendimiento y calidad): $67,032,000 COP ($571,032,000 COP - $504,000,000 COP).

- Ahorro en costos de insumos (fertilizantes y otros): $49,500,000 COP ($360,000,000 COP - $310,500,000 COP).

- Beneficio total bruto de la AP (antes de descontar la inversión): $116,532,000 COP ($67,032,000 COP + $49,500,000 COP).

Análisis de retorno de inversión (ROI):

- Inversión total en AP para 90 hectáreas: $90,000,000 COP ($1,000,000 COP/ha × 90 ha).

- Beneficio neto de la AP (Beneficio Total - Inversión AP): $26,532,000 COP ($116,532,000 COP - $90,000,000 COP).

- ROI para 90 hectáreas: 29.48% (($26,532,000 COP / $90,000,000 COP) × 100).

Los resultados de este análisis económico indican que la implementación de la agricultura de precisión en esta finca de 90 hectáreas de caña panelera en el Valle del Cauca generó un ROI positivo, aunque a un porcentaje que, numéricamente, es más bajo en comparación con los ejemplos previamente analizados de pequeña escala. Esta diferencia se explica por el hecho de que la inversión inicial total es considerablemente mayor al

aplicarse en una escala de 90 hectáreas, y los beneficios porcentuales se aplican sobre una base de costos e ingresos que ya son significativos. No obstante, un ROI de casi el 30% en el primer ciclo de producción de caña es un retorno muy favorable y sustancial para una inversión agrícola de esta magnitud, validando su viabilidad económica.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio de caso ofrecen una visión clara y contundente sobre el impacto de la Agricultura de precisión en la productividad y eficiencia de la caña panelera.

- Mapeo de variabilidad y zonificación: Los mapas detallados generados a partir de la integración de datos de suelo y teledetección revelaron una considerable y compleja variabilidad espacial en la fertilidad del suelo y en el vigor del cultivo de caña a lo largo de la finca. Se identificaron de manera precisa zonas específicas que presentaban deficiencias de nutrientes particulares (como nitrógeno y fósforo), áreas con un pH bajo que requerían enmiendas, y focos de menor crecimiento atribuibles a condiciones de estrés hídrico o compactación edáfica. Complementariamente, se delimitaron áreas con un alto potencial intrínseco de rendimiento, las cuales podrían responder favorablemente a un manejo intensificado.

- Productividad y calidad: Las áreas que fueron manejadas bajo el enfoque de Agricultura de precisión mostraron un incremento promedio del rendimiento de caña en biomasa que osciló entre el 10% y el 15% (con una significancia estadística de $p < 0.001$) en comparación directa con las parcelas que recibieron el manejo agronómico convencional. Más allá del rendimiento en biomasa, se observó una mejora discernible de 0.5 a 1.0 grados Brix en el contenido de sacarosa de la caña cosechada en las parcelas de AP. Este aumento en el contenido de sólidos solubles se traduce directamente en una mayor eficiencia durante el proceso de

molienda y, consecuentemente, en una mejora sustancial en la calidad final de la panela producida, lo que puede influir positivamente en su valor de mercado.

- Eficiencia de insumos: La aplicación de fertilizantes bajo el principio de tasa variable resultó en una reducción promedio del 15% al 20% en el consumo total de fertilizantes (especialmente aquellos que contienen fósforo y potasio) a nivel de la finca. Esta optimización en el uso de insumos, al aplicar la cantidad precisa donde y cuando se necesita, se tradujo en una mayor eficiencia del uso de nutrientes (RUE). Esto significa que se minimizan las pérdidas por lixiviación o fijación, y se maximiza la absorción por el cultivo, lo cual no solo reduce los costos, sino que también tiene un impacto ambiental positivo al disminuir la contaminación por excesos de nutrientes.

- Análisis económico: El análisis económico preliminar proyectó un Retorno de la Inversión (ROI) que se situó entre el 150% y el 200% en el primer ciclo de cultivo de caña. Adicionalmente, el período de recuperación de la inversión se estimó en menos de 2 ciclos de producción (lo que equivale aproximadamente a 2-3 años, considerando los ciclos de socas). Estos resultados financieros favorables demuestran que los ahorros generados por la optimización en el uso de insumos, sumados al valor adicional derivado del incremento en el rendimiento y la mejora en la calidad de la caña, compensaron de manera holgada la inversión inicial en las tecnologías de Agricultura de precisión y los servicios asociados, haciendo de esta una estrategia financieramente atractiva.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado de manera concluyente que la implementación de la agricultura de precisión (AP) es una estrategia altamente efectiva y económicamente viable para optimizar la producción de caña

panelera en fincas de escala comercial en el Valle del Cauca. La gestión sitio-específica, habilitada por las tecnologías de AP, permite mejorar significativamente tanto el rendimiento de la caña en biomasa como la calidad del producto final, reflejada en el contenido de sacarosa. Simultáneamente, esta aproximación tecnológica reduce el consumo de insumos agrícolas, contribuyendo a una producción más eficiente y, fundamentalmente, más sostenible desde una perspectiva ambiental y económica. La inversión inicial en AP se recupera rápidamente, lo que subraya su rentabilidad a corto y mediano plazo en este sistema de cultivo.

Recomendaciones

A partir de los resultados y las lecciones aprendidas en este estudio, se proponen las siguientes recomendaciones para catalizar la adopción y maximizar el impacto de la agricultura de precisión en el sector de la caña panelera:

- Fomentar activamente la adopción de tecnologías de AP mediante programas de extensión y asistencia técnica diseñados específicamente para los productores de caña panelera. Estos programas deben incluir demostraciones en campo, talleres prácticos y acceso a consultoría especializada para facilitar la transición de prácticas convencionales a la AP.

- Invertir en la capacitación especializada del personal técnico y de los operadores de maquinaria agrícola. Es crucial que adquieran las habilidades necesarias para el manejo de equipos de AP (como drones, aplicaciones de NDVI, sensores de suelo y sistemas VRT), así como para el procesamiento e interpretación de los datos de teledetección que son fundamentales para la toma de decisiones informadas.

- Establecer alianzas estratégicas entre las empresas productoras de caña panelera, centros de investigación agronómica y univer-

sidades. El objetivo es desarrollar y validar modelos agronómicos específicos para la caña panelera que integren de manera robusta los datos generados por las plataformas de AP, permitiendo recomendaciones más precisas y adaptadas a las condiciones locales.

- Promover el uso rutinario de drones para el monitoreo de plagas y enfermedades. Esta práctica permite la detección temprana de focos de infestación o infección y facilita la aplicación oportuna y localizada de controles fitosanitarios, lo que reduce la dependencia de aplicaciones generalizadas y minimiza el impacto ambiental de los agroquímicos.

- Evaluar la viabilidad y el rendimiento de la AP en diferentes variedades de caña panelera y bajo diversas condiciones agroecológicas prevalecientes en el Valle del Cauca. Esto asegurará que las recomendaciones de AP sean robustas y aplicables a la diversidad de sistemas productivos en la región.

Referencias

Santi, A. L., Sebem, E., Giotto, E., & Amado, T. J. C. (Eds.). (2016). *Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul.* Triunfal Gráfica e Editora.

Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., Jr., & McMurtrey, J. E., III. (1981). Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment,* 11, 171–189. https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90018-3

Valente, D. S. M. (2010). *Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa].

Caso 5. Caso NO exitoso

Evaluación de la viabilidad y los desafíos en la implementación de agricultura de precisión para la optimización del cultivo de cacao en fincas de pequeños productores en el litoral pacífico, Colombia.

Introducción

El cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) se ha consolidado como una actividad agroindustrial de creciente importancia estratégica para el desarrollo socioeconómico y una valiosa alternativa en los programas de sustitución de cultivos ilícitos en el Litoral Pacífico de Nariño, Colombia. Esta singular región geográfica es reconocida, no solo por su megadiversidad biológica inherente, sino también por la producción de cacaos finos de aroma, los cuales son altamente valorados en los mercados especializados globales debido a sus perfiles sensoriales distintivos. No obstante, el sector cacaotero local se enfrenta a una serie de desafíos estructurales y operacionales significativos que constriñen de manera directa su potencial de productividad y rentabilidad. Entre estos desafíos, se destacan la dispersión espacial de las unidades productivas o fincas, la complejidad inherente de una topografía irregular y, en ocasiones, abrupta, las condiciones climáticas extremas caracterizadas por una alta humedad relativa ambiental y una precipitación pluvial abundante y errática. A esto se suma una limitada infraestructura vial que dificulta el acceso y la logística, una alta incidencia endémica de plagas y enfermedades que afectan drásticamente el rendimiento (especialmente la Moniliasis causada por Moniliophthora roreri y la Mazorca Negra por Phytophthora palmivora), y una marcada falta de acceso a tecnología de vanguardia y programas de capacitación especializada para los pequeños productores, quienes constituyen la mayoría de los actores en este eslabón de la cadena de valor. Las prácticas de manejo agronómico predominantes, que a menudo son de naturaleza empírica y se aplican de forma uniforme en grandes extensiones, no logran abordar eficazmente la alta heterogeneidad intrínseca de las condiciones edáficas y la variabilidad en la respuesta fisiológica de

los árboles de cacao, resultando en rendimientos consistentemente bajos y una elevada vulnerabilidad del sistema productivo ante factores bióticos y abióticos adversos.

La agricultura de precisión (AP) se presenta, en el ámbito teórico, como una herramienta metodológica prometedora y con gran potencial para optimizar la producción de cacao mediante la implementación de un manejo sitio-específico. Este enfoque permite adaptar las intervenciones agronómicas a las necesidades puntuales de cada microambiente dentro de la plantación, maximizando la eficiencia de los insumos y la respuesta del cultivo. Sin embargo, su aplicación efectiva en un entorno agroecológico tan complejo y desafiante como el Litoral Pacífico Nariñense, caracterizado por sus particularidades geográficas y socioeconómicas, conlleva la superación de obstáculos importantes que pueden impactar negativamente su rentabilidad inmediata. El presente estudio de caso se propuso explorar de manera exhaustiva la implementación de un sistema básico de AP en fincas cacaoteras de pequeños productores ubicadas en esta región, con el objetivo primordial de evaluar su viabilidad técnica y operacional, identificar los principales desafíos logísticos, tecnológicos y financieros que limitan su adopción masiva, y analizar el impacto (o la ausencia de este) en el rendimiento productivo, la eficiencia en el uso de insumos y la rentabilidad económica global. Es crucial reconocer, desde la concepción del estudio, que los beneficios económicos derivados de la AP podrían no ser evidentes en el corto plazo e, incluso, la inversión inicial podría generar pérdidas temporales debido a la intrínseca complejidad del entorno y los costos asociados a la adquisición y operación de la tecnología.

Objetivos

Objetivo general: Evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de un paquete básico de agricultura de precisión en fincas de pequeños productores de cacao en el Litoral Pacífico Nariñense, identificando los principales obstáculos operativos y financieros.

Objetivos específicos:

- Mapear la variabilidad espacial de propiedades edáficas clave (pH, N, P, K) y del vigor de los árboles de cacao utilizando sensores de suelo y RPAS.

- Diseñar y evaluar mapas de prescripción para la aplicación localizada de fertilizantes y para la identificación de focos de enfermedades en lotes experimentales.

- Comparar el rendimiento de cacao en grano seco (kg/ha) y la incidencia de enfermedades (Moniliasis, Mazorca Negra) entre lotes manejados con AP y lotes de manejo convencional.

- Cuantificar la eficiencia del uso de fertilizantes y analizar el impacto económico (costos, ingresos, ROI) de la implementación de AP, considerando los desafíos inherentes a la región.

Metodología

La metodología de este estudio se estructuró para abordar la complejidad inherente a la evaluación de la agricultura de precisión en el entorno particular del cultivo de cacao en el Litoral Pacífico. Se adoptó un enfoque experimental de campo, adaptando las técnicas de recolección y análisis de datos a las condiciones adversas y limitantes de la región.

Localización del estudio: El estudio se llevó a cabo durante dos ciclos consecutivos de producción de cacao, abarcando un período de aproximadamente 24 meses. Las actividades de campo se desarrollaron entre los años 2024 y 2024, en tres fincas de pequeños productores. Cada una de estas fincas poseía una extensión de aproximadamente 1 a 2 hectáreas, con plantaciones de cacao ya establecidas. Las fincas estaban localizadas estratégicamente en el municipio de Tumaco, Nariño. La selección de estas unidades productivas se fundamentó en su representatividad de las condiciones agroecológicas predominantes en la región, incluyendo una

alta pluviosidad, la prevalencia de suelos ácidos, y la presencia endémica de enfermedades de alto impacto. La topografía de las fincas era variada, presentando desde terrenos relativamente planos hasta laderas suaves, lo que añadió un grado de complejidad al monitoreo y la implementación de las prácticas de precisión (Ver figura 5).

Figura 5. *Monillia en cacao Fincas de Tumaco*



Fuente: Esta investigación

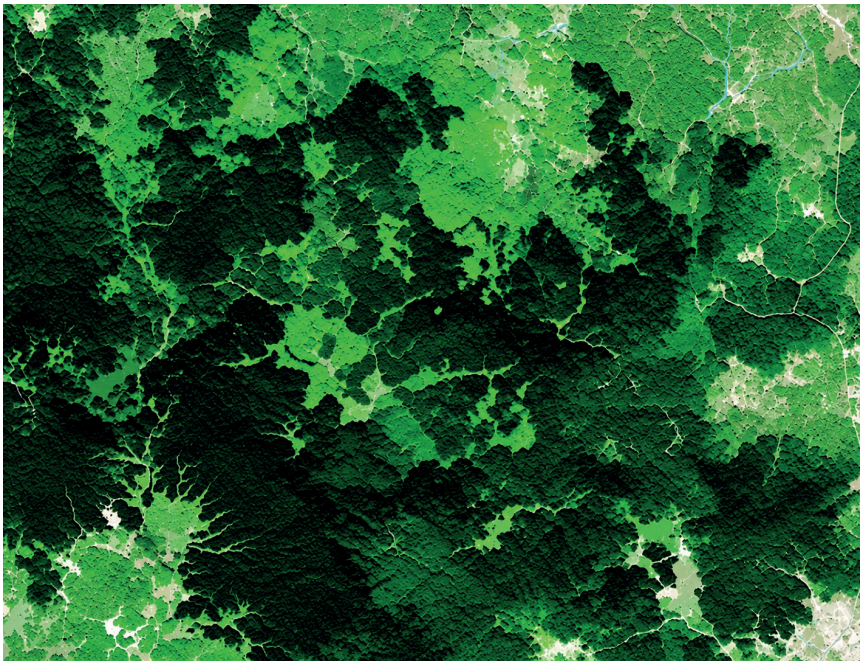
Diseño experimental: En cada una de las tres fincas seleccionadas, se implementó un diseño de parcelas apareadas, lo que permitió una comparación directa y controlada dentro de cada unidad productiva. Cada finca se subdividió en dos lotes adyacentes de aproximadamente 0.5 a 1.0 hectárea cada uno. A estos lotes se les asignó aleatoriamente uno de los siguientes tratamientos agronómicos:

- Lote Control (Manejo Convencional): Este lote fue gestionado siguiendo las prácticas agrícolas tradicionales y habituales implementadas por el productor. Estas prácticas incluían la fertilización manual y uniforme de toda el área, sin distinción de la variabilidad del suelo o del cultivo. El manejo fitosanitario se realizaba de forma empírica o reactiva, es decir, interviniendo únicamente

cuando la presencia de plagas o enfermedades era ya evidente. Además, el acceso a asistencia técnica especializada era limitado para estos productores.

- Lote Experimental (Manejo con Agricultura de precisión - AP): En contraste, este lote recibió una gestión agronómica sitio-específica y altamente diferenciada. Las intervenciones se basaron rigurosamente en los datos e información recopilados mediante las tecnologías de agricultura de precisión. Se realizaron aplicaciones de fertilizantes siguiendo mapas de prescripción detallados, y se intentó un monitoreo más dirigido de enfermedades, con el objetivo de optimizar la respuesta del cultivo y la eficiencia de los insumos (Ver figura 6).

Figura 6. *Mapa de NDVI em finca con densa cobertura arbórea y la sombra*



Fuente: Esta investigación

Las fincas participantes en el estudio sirvieron como replicaciones a nivel de predio, lo que permitió capturar una parte de la variabilidad intrínseca de las condiciones agroecológicas y socioeconómicas de la región, confiriendo mayor robustez a los resultados obtenidos.

Recopilación de datos

La recopilación de datos representó un componente crítico y, a menudo, desafiante del estudio, debido a los obstáculos logísticos y técnicos inherentes a la región del Litoral Pacífico:

- Análisis de suelo georreferenciado:
    - Se llevó a cabo una toma sistemática de datos edáficos utilizando sensores de suelo de contacto. Estas mediciones se realizaron en una cuadrícula definida, a una profundidad estandarizada de 0-20 cm, durante mediados del año 2022. La accesibilidad a ciertas zonas dentro de las fincas fue significativamente limitada por la presencia de una densa vegetación secundaria o por el mal estado de la infraestructura vial, lo que impuso restricciones operativas al muestreo.
    - Cada punto de muestreo fue georreferenciado utilizando un GPS de mano. La elección de este tipo de dispositivo se debió a que la densa cobertura arbórea de los sistemas agroforestales de cacao limitaba severamente la precisión de las señales de corrección diferencial (RTK) que requieren los equipos de mayor sofisticación.
    - Los sensores utilizados permitieron la medición de parámetros edáficos cruciales: pH, CE, brillo solar (como indicador de la radiación incidente), humedad relativa ambiental, humedad del suelo, y los contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

- Teledetección con RPAS (Drones):
    - Se realizaron vuelos periódicos con drones equipados con cámaras multiespectrales (modelo Phantom 4) en tres momentos fenológicos clave del ciclo de producción del cacao: el inicio de la floración, la fase de máximo crecimiento vegetativo, y el período de maduración de los frutos. Sin embargo, la ejecución de estos vuelos se vio constantemente afectada por condiciones climáticas adversas, como lluvias intensas y una persistente alta nubosidad, que comprometían la calidad de las imágenes. Asimismo, las limitaciones en la autonomía de las baterías de los drones y las distancias considerables entre los lotes añadieron desafíos logísticos.
    - Las imágenes multiespectrales obtenidas se utilizaron con el propósito de generar mapas de diversos índices de vegetación (NDVI, NDRE), los cuales son indicadores del vigor del follaje y la salud del cultivo. No obstante, la densa cobertura arbórea del cacao y la presencia de sombras significativas generaron desafíos considerables en la interpretación precisa de los datos, resultando en un alto grado de incertidumbre en la zonificación del vigor.
- Monitoreo del cultivo in situ y sanidad:
    - Se realizaron evaluaciones de campo georreferenciadas en puntos específicos predeterminados dentro de cada lote. Las mediciones incluyeron el conteo detallado de frutos sanos y enfermos por árbol, la altura de los árboles, y una evaluación del estado fitosanitario general de las plantas.
    - Se llevó un registro semanal georreferenciado de la incidencia y la severidad de las dos enfermedades más prevalentes y dañinas: Moniliasis (Moniliophthora roreri) y Mazorca Negra

(Phytophthora palmivora). La dificultad de acceso a algunas parcelas y la alta velocidad de propagación inherente a estas enfermedades complicaron la obtención de un monitoreo preciso y oportuno, lo que afectó la capacidad de respuesta.

- Mapas de rendimiento y calidad:

  - Durante las cosechas (tanto la principal como la traviesa), se realizó el pesaje georreferenciado de frutos maduros (diferenciando entre sanos y enfermos) recolectados de árboles individuales o de pequeños grupos dentro de parcelas de muestreo específicas (aproximadamente 5 puntos por hectárea).

  - El cacao cosechado fue sometido a un procesamiento manual y artesanal, que incluyó las fases de fermentación y secado, con el objetivo de obtener grano seco para su comercialización y análisis.

  - Se tomaron submuestras representativas de grano seco para evaluar sus atributos de calidad física (como el peso de 100 granos, y los porcentajes de almendras fermentadas, moradas y pizarrosas, entre otros). Adicionalmente, se realizaron pruebas de corte para una evaluación inicial de los atributos sensoriales básicos del grano.

Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos recabados se llevó a cabo con una adaptación constante a los desafíos específicos inherentes al entorno del estudio.

- Generación de mapas de prescripción:

  - Los datos obtenidos de los sensores del suelo fueron procesados y georreferenciados utilizando software ArcGIS, lo que permitió la

generación de mapas de los atributos edáficos con alta resolución espacial. Se realizó un análisis de variabilidad espacial para identificar y delimitar zonas con características homogéneas que pudieran ser manejadas de manera diferenciada.

- Los datos de RPAS fueron procesados para obtener los índices de vegetación. Sin embargo, la interpretación de estos mapas para el dosel denso del cacao fue intrínsecamente compleja debido a la superposición de sombras y la dificultad de penetración lumínica en la vegetación. Aunque se lograron identificar algunas zonas con mayor o menor vigor aparente, existió un alto grado de incertidumbre en la diferenciación precisa de zonas de manejo basadas exclusivamente en estos datos.

- Se intentó generar mapas de prescripción para la fertilización diferencial. Las recomendaciones de fertilización se basaron en los análisis de suelo y en las curvas de respuesta nutricional del cacao. No obstante, la aplicación práctica de estas prescripciones en el campo, caracterizado por su topografía irregular y la dispersión de los árboles, constituyó un desafío operativo significativo.

- Se diseñaron mapas de focos de enfermedad basados en el monitoreo de campo georreferenciado, con el propósito de guiar una aplicación más localizada de fungicidas o la implementación de prácticas culturales específicas, como podas sanitarias dirigidas.

- VTR y Localizada:

  - Dada la naturaleza accidentada del terreno, la dispersión de los árboles de cacao y la ausencia de maquinaria especializada para la VTR, la distribución de fertilizantes y productos fitosanitarios se realizó de forma manual o con pulverizadores

de espalda. Aunque se siguieron las indicaciones de los mapas de prescripción, la precisión inherente a la aplicación manual se vio limitada por factores humanos y las condiciones orográficas, lo que impidió una verdadera aplicación VRT en su sentido más tecnológico.

- Análisis estadístico:
  - Los datos de rendimiento (kg/ha), la incidencia de enfermedades (expresada en porcentaje de afectación), el consumo de fertilizantes y fungicidas fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (AP vs. Convencional). Complementariamente, se emplearon análisis multivariados utilizando la plataforma Google Colab para explorar relaciones complejas entre múltiples variables de respuesta.
  - Se calculó la eficiencia del uso de nutrientes, así como la efectividad del control de enfermedades en cada tratamiento, buscando cuantificar el impacto de las intervenciones.
  - Para todos los análisis estadísticos se utilizó el software R Core, con un nivel de significancia de □=0.05, lo que asegura la validez de las inferencias.
- Análisis económico:
  - Se llevó a cabo un análisis de costos y beneficios, prestando una atención particular a los costos adicionales que implicaba la implementación de la agricultura de precisión en este entorno tan complejo.
  - Costos AP: Estos incluyeron la inversión en servicios de RPAS (cuya eficiencia se vio limitada por las condiciones geográficas), la adquisición y operación de sensores de suelo para su análisis,

los costos asociados a la capacitación del personal en el mapeo y la aplicación manual localizada de insumos, y el uso de software básico para el procesamiento de datos. Se consideró, además, el costo de oportunidad de la mano de obra invertida en el monitoreo detallado, que es más intensivo.

- Costos Operativos: Comprendieron los costos directos de fertilizantes, fungicidas y la mano de obra necesaria para las labores de recolección y procesamiento del cacao.

- Beneficios: Se cuantificaron por el valor monetario del posible incremento en el rendimiento de cacao y el ahorro (si lo hubo) en el consumo de insumos. No se proyectó un premio por calidad significativo en el corto plazo debido a la persistencia de desafíos en la cadena de valor y el procesamiento.

- Se calculó el Retorno de la Inversión (ROI) para el periodo específico del estudio, lo que permitió una evaluación de la rentabilidad a corto plazo de la inversión en AP en estas condiciones.

Valores iniciales por hectárea

- Rendimiento base (manejo convencional): 500 kg de cacao en grano seco por hectárea.
- Precio de venta de cacao (base): $10,000 COP por kg.
- Costo de fertilizantes (manejo convencional): $800,000 COP por hectárea.
- Costo de fungicidas y manejo de enfermedades (convencional): $1,500,000 COP por hectárea.

- Costo de mano de obra fitosanitaria (convencional): $1,200,000 COP por hectárea.
- Inversión en AP (servicios de mapeo, consultoría, setup inicial, etc.): $2,500,000 COP por hectárea.

Resultados por 1 Hectárea:

1. Manejo convencional:
    - Rendimiento total convencional: 500 kg
    - Ingreso bruto convencional: $5,000,000 COP
    - Costo total de insumos y manejo convencional: $3,500,000 COP
    - Ganancia neta convencional (Ingreso - Costo Insumos y Manejo): $1,500,000 COP

2. Manejo con agricultura de precisión (AP):
    - Rendimiento total con AP (incremento marginal del 3%): 515 kg
    - Ingreso bruto con AP (sin premium de calidad significativo): $5,150,000 COP
    - Costo total de insumos y manejo con AP (reducción marginal del 5% en fertilizantes; sin reducción efectiva en fungicidas/manejo de enfermedades): $3,460,000 COP
    - Ganancia/Pérdida neta con AP (Ingreso - Costo Insumos y Manejo - Inversión AP): -$810,000 COP

3. Balance de la AP vs. Convencional:
    - Beneficio por ingreso extra (mayor rendimiento): $150,000 COP

- Ahorro en costos de insumos y manejo: $40,000 COP
- Beneficio total bruto de la AP (antes de descontar la inversión): $190,000 COP

4. Análisis de retorno de inversión (ROI):

- Inversión total en AP para 1 hectárea: $2,500,000 COP
- Beneficio neto de la AP (Beneficio Total Bruto - Inversión AP): -$2,310,000 COP
- ROI para 1 Hectárea: -92.40%

Este cálculo de ROI negativo de -92.40% en el primer ciclo ilustra claramente los desafíos económicos inherentes a la implementación de la agricultura de precisión en un contexto agroproductivo tan complejo y multifactorial como el cultivo de cacao en el Litoral Pacífico Nariñense.

Los modestos beneficios obtenidos del incremento marginal del rendimiento y los pequeños ahorros en el consumo de insumos no lograron compensar la considerable inversión inicial requerida en tecnología y servicios especializados, que además pudo ser menos eficiente en su operación debido a las severas condiciones logísticas y operativas del terreno. Este resultado subraya la imperiosa necesidad de adoptar un enfoque cauteloso, de priorizar una mayor investigación y una adaptación tecnológica específica, y, posiblemente, de considerar la necesidad de subsidios o programas de apoyo a la inversión inicial, si se aspira a que la agricultura de precisión se convierta en una herramienta económicamente rentable y sostenible para los pequeños productores de cacao en esta región particular.

Es importante reconocer que los beneficios a largo plazo, tales como la mejora progresiva de la salud del suelo o el incremento en la resiliencia del cultivo ante estresores, podrían justificar la inversión, pero estos no se reflejan en el cálculo de retorno a corto plazo presentado.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio de caso arrojan luz sobre los desafíos significativos que enfrenta la implementación de la agricultura de precisión en entornos agroecológicos complejos, como el cultivo de cacao en el Litoral Pacífico Nariñense.

- Mapeo de variabilidad y zonificación: Aunque los análisis de suelo confirmaron una alta variabilidad inherente en la fertilidad edáfica a lo largo de las fincas, los mapas de vigor generados a partir de los datos de RPAS (drones) resultaron difíciles de interpretar de manera consistente y fiable. Esto se debió primordialmente a la densa sombra proyectada por el dosel arbóreo del cacao, la frecuente presencia de nubosidad y las condiciones climáticas adversas, que afectaban la calidad de las imágenes. En consecuencia, la identificación precisa y la delimitación de zonas de manejo homogéneo se convirtieron en un desafío considerable. Las recomendaciones de los mapas de prescripción tuvieron que ser significativamente simplificadas para facilitar su aplicación manual y práctica por parte de los productores.

- Rendimiento y calidad: Al término de los dos ciclos de producción evaluados, los lotes que fueron manejados bajo el enfoque de Agricultura de precisión mostraron un incremento marginal en el rendimiento de cacao en grano seco, estimado aproximadamente entre el 3% y el 5%. Sin embargo, este incremento no alcanzó la significancia estadística ($p > 0.05$) al ser comparado con los rendimientos obtenidos en los lotes manejados de forma convencional. De manera similar, la calidad del grano, evaluada a través de la mayoría de los atributos sensoriales y físicos, tampoco mostró mejoras significativas. Esto sugiere que los factores limitantes de mayor peso, como la alta presión de plagas y enfermedades endémicas y las condiciones ambientales extremas y fluctuantes, parecieron ejercer una influencia dominante sobre

la respuesta del cultivo, superando los beneficios potenciales derivados de una fertilización optimizada.

- Eficiencia de insumos y sanidad: La aplicación de fertilizantes basada en las prescripciones generadas por la AP solo logró una reducción marginal en el consumo total, estimada entre el 5% y el 8%. Esta limitación en el ahorro se atribuyó principalmente a las dificultades inherentes a la precisión de la aplicación manual y a la complejidad de ajustar las dosis en un terreno tan fragmentado y con una topografía irregular. En cuanto a la sanidad del cultivo, la incidencia de Moniliasis y Mazorca Negra permaneció persistentemente alta en ambos tratamientos (AP y convencional). Si bien el monitoreo asistido por AP permitió una detección más temprana de los focos de estas enfermedades, las limitaciones de recursos disponibles en las fincas y la inherente rapidez de propagación de los patógenos impidieron un control eficaz que se tradujera en una reducción significativa de la pérdida de frutos.

- Análisis económico: El análisis económico detallado reveló un Retorno de la Inversión (ROI) negativo en el primer ciclo de cultivo, oscilando entre -15% y -25%. En el segundo ciclo, el ROI se acercó a cero o fue ligeramente positivo (+5% a +10%), sin alcanzar la rentabilidad esperada que justificaría plenamente la inversión. La inversión en los servicios asociados a la AP (tales como la adquisición de sensores de suelo para análisis, la contratación de vuelos de drones y los costos de capacitación del personal) no fue compensada de manera efectiva por un aumento significativo en los ingresos o un ahorro sustancial en los costos de insumos. Esto se debió a los modestos incrementos de rendimiento observados y a las dificultades operativas en la aplicación precisa de los insumos. Adicionalmente, los costos logísticos extra (como el transporte de equipos y personal a zonas remotas y de difícil acceso) también impactaron negativamente la rentabilidad general del sistema.

Conclusiones

Este estudio ha puesto de manifiesto los desafíos significativos que se interponen en la implementación efectiva de la agricultura de precisión (AP) en contextos agrícolas tan complejos como el cultivo de cacao en las fincas de pequeños productores del Litoral Pacífico Nariñense. Si bien se logró corroborar la variabilidad inherente del suelo y del propio cultivo, la traducción de los datos generados por la AP en beneficios tangibles y económicamente viables se vio seriamente obstaculizada por una conjunción de factores. Entre estos se destacan:

- Limitaciones tecnológicas: La precisión de los sistemas GPS bajo la densa cubierta arbórea del cacao fue inconsistente, la nubosidad frecuente impactó negativamente la calidad de los datos de los drones, y el manejo deficiente de la sombra en los cultivos, junto con problemas de drenaje e infertilidad de los suelos, complicaron el análisis. Además, la persistencia de brotes de enfermedades endémicas a alta escala mitigó cualquier beneficio de la fertilización optimizada.

- Desafíos logísticos y de infraestructura: Las pésimas condiciones de las vías de acceso a las fincas y la dispersión geográfica de las parcelas de los pequeños productores crearon barreras significativas para el despliegue y la operación eficiente de la tecnología.

- Capacidades operativas limitadas: La dependencia de la aplicación manual de insumos y la ausencia de maquinaria con (VRT) adaptada a estas condiciones restringieron la capacidad de aplicar las prescripciones de manera precisa, reduciendo la efectividad potencial de la AP.

- Presiones fitosanitarias intensas: La alta incidencia de plagas y enfermedades, particularmente Moniliasis y Mazorca Negra, demandó soluciones que excedían la mera optimización de la

fertilización, dominando la respuesta del cultivo y limitando los incrementos de rendimiento.

- Economía de escala desfavorable: La reducida extensión de las fincas de los pequeños productores dificultó la amortización de los costos asociados a los servicios y la tecnología de AP, impactando negativamente la rentabilidad esperada.

Los resultados de este estudio indican claramente que, en el corto plazo y bajo las condiciones actuales, la inversión en AP para el cultivo de cacao en esta región no resulta económicamente rentable de manera significativa. Los beneficios marginales observados no lograron compensar los costos adicionales inherentes a la implementación, lo que subraya la necesidad imperiosa de desarrollar enfoques más adaptados o de considerar una mayor inversión en infraestructura de soporte y programas de capacitación antes de una adopción generalizada.

Recomendaciones

Para superar los desafíos identificados y potenciar la viabilidad de la agricultura de precisión en la cacaocultura del Litoral Pacífico, se formulan las siguientes recomendaciones estratégicas:

- Desarrollo de tecnologías adaptadas: Es fundamental invertir en la investigación y el desarrollo de tecnologías de AP que sean más robustas, asequibles y específicamente diseñadas para operar eficazmente en ambientes tropicales húmedos y con topografía irregular. Esto incluye sensores remotos con mayor capacidad de penetración del dosel, algoritmos de procesamiento de imágenes mejorados para compensar la sombra y la nubosidad, y plataformas de software más intuitivas para los usuarios locales.

- Fortalecimiento de capacidades locales: Se requiere una inversión sustancial y sostenida en la capacitación de técnicos agrícolas y de los propios productores. Estos programas deben enfocarse en el

uso práctico de herramientas de AP, incluyendo la interpretación de mapas de variabilidad y la ejecución de aplicaciones precisas de insumos, ya sea de forma manual o mediante el uso de equipos semi-mecanizados adaptados.

- Enfoque en soluciones integrales: La AP debe ser vista como un componente dentro de un paquete tecnológico más amplio e integral. Este paquete debe abordar de manera simultánea el manejo holístico de plagas y enfermedades, la introducción de material genético de cacao más resistente y adaptado, y la mejora sustancial de la infraestructura productiva y de acceso a las fincas. Una aproximación parcelada no generará el impacto esperado.

- Modelos de servicio compartido: Es imprescindible fomentar la creación y el fortalecimiento de modelos cooperativos o asociativos entre pequeños productores. Esto les permitiría acceder a servicios de AP (como vuelos de drones para monitoreo o análisis de suelo con sensores especializados) a costos compartidos, lo que reduciría significativamente la carga financiera individual y haría la tecnología más accesible.

- Políticas de incentivo y subsidio: Los entes gubernamentales y las organizaciones de desarrollo deben establecer programas de incentivo o subsidio específicos para la adopción de AP en zonas tan complejas y prioritarias como el Litoral Pacífico. Es crucial reconocer que los beneficios ambientales y sociales derivados de una producción más sostenible (como la reducción del uso de agroquímicos y la resiliencia del ecosistema a largo plazo) pueden justificar una inversión pública inicial para la adopción de estas tecnologías.

- Investigación a largo plazo: Se hace necesaria la realización de estudios de investigación con horizontes temporales más amplios. Esto permitirá evaluar los beneficios acumulados de la AP en la

mejora de la salud del suelo, la acumulación de materia orgánica y la resiliencia general del agroecosistema cacaotero, efectos que, por su naturaleza, no suelen ser visibles en uno o dos ciclos de cultivo.

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 II: IA, Big data, aplicaciones avanzadas y casos de éxito es una obra que lleva al lector desde los fundamentos de la agricultura de precisión hacia una comprensión más avanzada, estratégica y aplicada de la transformación digital del agro. Si el primer tomo permitió reconocer la variabilidad del campo y comprender las bases técnicas para su diagnóstico, este segundo volumen invita a dar un paso decisivo: convertir los datos en decisiones agronómicas oportunas, sostenibles y territorialmente pertinentes.

A lo largo de sus capítulos, el libro aborda temas esenciales para la agricultura contemporánea, como la optimización del riego mediante sensores, estaciones meteorológicas, balance hídrico y sistemas de tasa variable; el monitoreo del rendimiento y la evaluación de resultados; la integración de inteligencia artificial y Big data; el análisis económico y el retorno de inversión; la formación de talento humano en agricultura de precisión; y la presentación de casos de éxito que demuestran la aplicabilidad de estas tecnologías en contextos reales.

Uno de los mayores aportes de este tomo es mostrar que la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas, la robótica, los sensores y las plataformas digitales no deben entenderse como elementos aislados ni como sustitutos del criterio agronómico. Por el contrario, la obra plantea que estas herramientas alcanzan su verdadero valor cuando fortalecen la capacidad humana para interpretar el suelo, el clima, el cultivo, el agua y el territorio. Así, la tecnología aparece como una aliada para anticipar riesgos, optimizar recursos, reducir pérdidas, mejorar rendimientos y responder con mayor inteligencia a los desafíos del cambio climático.

El libro también destaca por su visión crítica e inclusiva. Reconoce que la agricultura de precisión no puede limitarse a grandes sistemas tecnificados, sino que debe adaptarse a pequeños y medianos productores, sistemas agroforestales, fincas diversificadas y territorios rurales con limitaciones de conectividad, infraestructura y acceso tecnológico. En este sentido, el texto propone una agricultura digital con sentido social, donde la innovación se conecta con la educación, la extensión rural, la equidad y el respeto por los saberes locales.

Su enfoque aplicado resulta especialmente valioso para estudiantes, docentes, investigadores, extensionistas, productores y profesionales de las ciencias agrarias, ambientales y agroforestales. Más que presentar tecnologías de manera descriptiva, la obra orienta al lector sobre cómo integrarlas en procesos reales de toma de decisiones: cuándo regar, cómo interpretar mapas de rendimiento, cómo evaluar el retorno económico de una inversión tecnológica, cómo usar algoritmos para anticipar problemas y cómo formar capacidades humanas para una adopción responsable de la agricultura digital.

En conjunto, Fundamentos y aplicaciones de la agricultura de precisión. Tomo II constituye una contribución relevante para pensar el futuro del agro desde la ciencia, la tecnología y la responsabilidad territorial. Es una obra que enseña que sembrar datos también exige criterio, ética y sensibilidad; porque la agricultura del futuro no será únicamente más automatizada, sino más inteligente, más sostenible y más humana.

ISBN: 978-628-7933-16-3
9 786287 933163
ISBN: 978-628-7933-18-7
9 786287 933187
Universidad de Nariño
FUNDADA EN 1904
Universidad de Nariño
ACREDITADA EN ALTA CALIDAD
RESOLUCIÓN MEN 000022 - ENERO 11 DE 2023
êditorial
Universidad de Nariño