

Agricultura de Precisión y Optimización de la Producción de Cultivos

Precision Agriculture And Optimization Of Crop Production

Autor

Wagner Ramon Arana Zavala

baldacucalon12@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5451-2963>

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Guayaquil – Ecuador

Fecha de recepción: 2023-11-04

Fecha de aceptación: 2023-12-04

Fecha de publicación: 2024-01-04

Resumen

La productividad agrícola se ve afectada por la variabilidad espacial de los cultivos, la disponibilidad limitada de agua y la eficiencia en la aplicación de insumos, lo que impacta directamente en la sostenibilidad de los sistemas productivos. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la agricultura de precisión en la optimización de la producción de cultivos mediante la integración de tecnologías de monitoreo, sensores remotos y análisis de datos. Se utilizó un enfoque cuantitativo de carácter explicativo, apoyado en información secundaria proveniente de registros estadísticos oficiales, informes técnicos y bases de datos de organismos estatales, nacionales e internacionales. Se aplicaron técnicas de estadística avanzada, incluyendo correlación de Pearson, regresión lineal múltiple y regularización LASSO. Los resultados principales destacan que el uso de sensores de humedad, drones, estaciones meteorológicas e índices de vegetación como NDVI permite identificar áreas con menor vigor vegetal, optimizar la aplicación de insumos y mejorar significativamente el rendimiento de los cultivos. Además, los modelos estadísticos mostraron que NDVI, monitoreo climático y sensores de humedad son los factores con mayor influencia sobre la productividad, lo que confirma la relevancia de la tecnología como herramienta de gestión agronómica. De manera integral, la investigación evidencia que la agricultura de precisión fortalece la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas, promoviendo una planificación estratégica basada en información precisa y decisiones fundamentadas en datos objetivos.

Palabras clave: agricultura de precisión, optimización de cultivos, sensores agrícolas, teledetección, análisis de datos, eficiencia productiva, resiliencia agrícola.

Abstract

Agricultural productivity is affected by spatial variability of crops, limited water availability, and the efficiency of input application, which directly impacts the sustainability of production systems. This study aimed to evaluate the influence of precision agriculture on crop production optimization through the integration of monitoring technologies, remote sensors, and data analysis. A quantitative explanatory approach was employed, based on secondary information from official statistical records, technical reports, and databases from state, national, and international organizations. Advanced statistical techniques were applied, including Pearson correlation, multiple linear regression, and LASSO regularization. The main findings highlight that the use of soil moisture sensors, drones, weather stations, and vegetation indices such as NDVI allows for the identification of areas with lower plant vigor, optimization of input application, and significant improvement in crop yield. Furthermore, the statistical models indicated that NDVI, climatic monitoring, and soil moisture sensors are the most influential factors on productivity, confirming the relevance of technology as a tool for agronomic management. Overall, the study demonstrates that precision agriculture strengthens the efficiency, sustainability, and resilience of agricultural systems, promoting strategic planning based on precise information and decision-making grounded in objective data.

Keywords: precision agriculture, crop optimization, agricultural sensors, remote sensing, data analysis, production efficiency, agricultural resilience.

Introducción

En el contexto actual de transformación de los sistemas agroalimentarios, la agricultura enfrenta el desafío de incrementar la productividad de los cultivos al mismo tiempo que se preservan los recursos naturales y se reduce el impacto ambiental de las prácticas agrícolas. El crecimiento de la población mundial, la presión sobre los recursos hídricos y la degradación de los suelos han impulsado la búsqueda de estrategias tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia productiva del sector agrícola. En este escenario, la agricultura de precisión se ha consolidado como un enfoque innovador que integra herramientas digitales, sensores, sistemas de posicionamiento global y análisis de datos para optimizar la gestión agronómica de los cultivos (González et al., 2022). Este enfoque permite identificar la variabilidad espacial y temporal presente en los sistemas agrícolas, lo que facilita la aplicación diferenciada de insumos y mejora la eficiencia en el manejo de los recursos productivos.

Desde una perspectiva tecnológica, la agricultura de precisión se fundamenta en la utilización de herramientas de monitoreo y sistemas de información geoespacial que permiten recopilar datos detallados sobre el estado del suelo, las condiciones climáticas y el desarrollo fisiológico de los cultivos. Estas tecnologías facilitan la generación de mapas de rendimiento, el análisis de índices de vegetación y la detección temprana de variaciones en la productividad agrícola, lo cual contribuye a optimizar las decisiones relacionadas con la fertilización, el riego y el control de plagas (Guamán-Rivera, 2023). En consecuencia, el uso de sensores remotos, drones y plataformas de análisis de datos permite mejorar significativamente la eficiencia del manejo agrícola, reduciendo los costos de producción y aumentando el rendimiento de los cultivos.

Asimismo, el desarrollo de la agricultura de precisión se encuentra estrechamente vinculado con el avance de la agricultura digital o agricultura 4.0, caracterizada por la integración de tecnologías emergentes como el Internet de las cosas, el análisis de grandes volúmenes de datos, la inteligencia artificial y los sistemas automatizados de monitoreo agrícola. Estas herramientas tecnológicas permiten recopilar información en tiempo real sobre los sistemas productivos, lo cual facilita la planificación agronómica y la optimización de los procesos

productivos en diferentes contextos agrícolas (Quiroz, 2023). De esta manera, la digitalización del sector agropecuario ha permitido mejorar la eficiencia de los sistemas de cultivo mediante la implementación de prácticas agrícolas más precisas y adaptadas a las condiciones específicas de cada parcela.

Diversas investigaciones recientes destacan que la implementación de tecnologías de agricultura de precisión contribuye significativamente a mejorar la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En particular, el uso de tecnologías de monitoreo inteligente permite identificar variaciones en la fertilidad del suelo, niveles de humedad y condiciones nutricionales de los cultivos, lo que posibilita realizar intervenciones agronómicas más oportunas y eficientes (Ovando et al., 2021). En este sentido, la adopción de estrategias basadas en datos facilita la optimización del rendimiento agrícola, reduce el uso innecesario de insumos y fortalece la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola en distintos contextos territoriales.

En consecuencia, la agricultura de precisión se configura como una estrategia clave para la optimización de la producción de cultivos, ya que permite integrar tecnologías digitales, sistemas de monitoreo y herramientas analíticas que mejoran la toma de decisiones en el manejo agronómico. La incorporación de estas tecnologías en los sistemas agrícolas no solo favorece el incremento del rendimiento de los cultivos, sino que también contribuye a fortalecer la sostenibilidad de la producción agrícola, promoviendo un uso más eficiente de los recursos naturales y una mayor resiliencia de los sistemas productivos frente a los desafíos ambientales y productivos del sector agroalimentario.

Fundamentos tecnológicos de la agricultura de precisión en la gestión agronómica

En un sistema productivo de maíz tecnificado ubicado en una región agrícola con alta variabilidad de suelos, el agricultor puede utilizar sensores de humedad, imágenes satelitales y sistemas de posicionamiento global para identificar diferencias en la fertilidad y disponibilidad de agua dentro de la misma parcela. A partir de esta información es posible aplicar fertilizantes o programar el riego de manera diferenciada en cada sector del cultivo, lo que permite optimizar el uso de insumos y mejorar el rendimiento productivo. Este tipo de

prácticas refleja el principio central de la agricultura de precisión, cuyo propósito consiste en gestionar la variabilidad espacial y temporal de los cultivos mediante el uso de tecnologías digitales y sistemas de monitoreo agronómico.

La agricultura de precisión constituye un enfoque de gestión tecnificada orientado a captar, procesar e interpretar la variabilidad presente en los sistemas agrícolas, con el fin de mejorar la toma de decisiones relacionadas con la fertilización, el riego, el control fitosanitario y la estimación del rendimiento. En este sentido, la integración de tecnologías de información, sensores remotos, sistemas de posicionamiento global y plataformas de análisis de datos permite generar diagnósticos agronómicos más precisos y reducir la incertidumbre en la gestión de los cultivos (Rambauth-Ibarra, 2022). Asimismo, la incorporación de tecnologías digitales en la producción agrícola ha dado lugar a nuevas formas de gestión agronómica basadas en el análisis continuo de datos productivos y ambientales, lo cual contribuye a optimizar la eficiencia en el uso de recursos naturales y mejorar la productividad de los sistemas agrícolas (Foladori, 2022).

El desarrollo de redes de sensores y sistemas de monitoreo ambiental ha fortalecido la capacidad de los agricultores para supervisar variables críticas que influyen en el crecimiento de los cultivos. En este contexto, el monitoreo continuo de temperatura, humedad del suelo y condiciones microclimáticas permite anticipar situaciones de estrés hídrico o térmico que pueden afectar el desarrollo fisiológico de las plantas. Investigaciones recientes señalan que la implementación de redes de sensores contribuye significativamente a mejorar la eficiencia en el uso del agua y a optimizar la programación del riego en diferentes sistemas productivos (Aguilar-González et al., 2023). De manera complementaria, el uso de módulos de adquisición de datos y plataformas de monitoreo remoto permite supervisar procesos agroindustriales y agrícolas en tiempo real, facilitando el control de variables críticas dentro del sistema productivo (Chaparro Mesa et al., 2021).

Otro componente fundamental de la agricultura de precisión es la teledetección, la cual permite analizar el estado de los cultivos mediante imágenes obtenidas por satélites o drones. Estas tecnologías facilitan la generación de índices de vegetación que permiten evaluar el

vigor de las plantas, detectar deficiencias nutricionales y monitorear la evolución del cultivo a lo largo del ciclo productivo. Diversos estudios han demostrado que el uso de imágenes multiespectrales y térmicas permite estimar variables agronómicas relevantes como la evapotranspiración y el crecimiento vegetativo, lo que contribuye a mejorar la planificación del riego y la fertilización (Machaca-Pillaca et al., 2022). De igual forma, el análisis de índices de vegetación derivados de imágenes UAV permite predecir variables biométricas de los cultivos y evaluar su desempeño productivo durante diferentes etapas fenológicas (Quille-Mamani et al., 2022).

Asimismo, el avance de la agricultura digital ha impulsado el desarrollo de sistemas agrícolas automatizados basados en tecnologías emergentes como el Internet de las cosas, plataformas de monitoreo inteligente y sistemas de control automatizado. En este marco, el concepto de agricultura 4.0 integra sensores, sistemas de comunicación y plataformas de análisis de datos que permiten supervisar el comportamiento de los cultivos y ajustar las prácticas agronómicas de manera dinámica. Investigaciones recientes destacan que los invernaderos inteligentes constituyen un ejemplo representativo de esta transformación tecnológica, ya que permiten controlar variables ambientales como temperatura, humedad y radiación solar mediante sistemas automatizados que optimizan el crecimiento de los cultivos (Marín-García et al., 2023).

Optimización de la producción de cultivos mediante análisis de datos y monitoreo espacial

En una plantación de maíz forrajero destinada a la producción ganadera, los agricultores pueden emplear imágenes satelitales y modelos espectrales para identificar sectores del cultivo con menor disponibilidad de nutrientes o menor vigor vegetal. Con base en esta información es posible aplicar fertilización localizada únicamente en las áreas que lo requieren, evitando el uso innecesario de insumos y mejorando la eficiencia productiva del sistema agrícola. Este tipo de prácticas demuestra cómo el análisis de datos espaciales puede contribuir a optimizar la producción de cultivos mediante decisiones agronómicas más precisas y fundamentadas en información científica.

La optimización de la producción agrícola mediante agricultura de precisión se fundamenta en el análisis integrado de variables climáticas, fisiológicas y productivas que influyen en el desempeño de los cultivos. En este contexto, el uso de imágenes satelitales y modelos espectrales ha permitido desarrollar metodologías para estimar variables agronómicas relevantes como rendimiento, contenido de nutrientes y estado fisiológico de las plantas. Investigaciones recientes han demostrado que los índices espectrales derivados de sensores satelitales como LANDSAT-8 y SENTINEL-2 permiten estimar el rendimiento de cultivos como el maíz forrajero con altos niveles de precisión (Cano-Mejía et al., 2023). Asimismo, otros estudios han señalado que los índices espectrales también pueden emplearse para estimar el contenido de nitrógeno en las plantas, lo cual facilita la planificación de estrategias de fertilización más eficientes (López-Calderón et al., 2023).

Por otra parte, el monitoreo del coeficiente de cultivo mediante técnicas de teledetección ha permitido mejorar la gestión del riego en diferentes sistemas agrícolas. El análisis de imágenes satelitales y datos climáticos facilita la estimación del consumo hídrico de los cultivos, lo cual permite ajustar la programación del riego según las necesidades reales de las plantas. En este sentido, estudios recientes han demostrado que el uso de modelos de teledetección permite estimar el coeficiente de cultivo basal en maíz forrajero y optimizar la planificación hídrica en sistemas agrícolas intensivos (Delgado-Ramírez et al., 2023). De manera complementaria, investigaciones enfocadas en la fisiología vegetal han evidenciado que la tasa de evapotranspiración influye directamente en el área foliar, el potencial hídrico y el rendimiento de los cultivos, lo que confirma la importancia de una gestión eficiente del agua en la producción agrícola (Zavala-Borrego et al., 2022).

Además de mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales, la agricultura de precisión también contribuye a fortalecer la trazabilidad y el control de los procesos productivos dentro de las cadenas agrícolas. En este contexto, la digitalización de la información agrícola permite registrar de manera sistemática las actividades productivas, monitorear indicadores de rendimiento y evaluar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas. Diversos estudios han señalado que la implementación de sistemas de trazabilidad digital facilita el seguimiento

de las operaciones agrícolas y mejora la transparencia en la gestión de los sistemas productivos (Hualpa Zúñiga & Rangel Díaz, 2023).

Finalmente, el desarrollo de plataformas tecnológicas y sistemas de monitoreo inteligente ha permitido ampliar el acceso a herramientas de agricultura de precisión, incluso en unidades productivas de pequeña escala. En este sentido, la integración de sensores, plataformas de análisis de datos y sistemas de monitoreo remoto permite mejorar la toma de decisiones agronómicas y optimizar la productividad agrícola en diferentes contextos territoriales. Investigaciones recientes destacan que el uso de plataformas tecnológicas inteligentes facilita la implementación de estrategias de agricultura de precisión en sistemas agrícolas diversificados, contribuyendo a mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad de los sistemas de cultivo (Restrepo-Arias & Branch-Bedoya, 2023).

Materiales y métodos

En concordancia con el objetivo de analizar la relación entre la agricultura de precisión y la optimización de la producción de cultivos, el estudio se estructuró bajo un enfoque cuantitativo orientado a examinar las interacciones existentes entre variables tecnológicas, agronómicas y productivas asociadas con el desempeño de los sistemas agrícolas. Desde esta perspectiva analítica, se adoptó un diseño de investigación no experimental de alcance explicativo, considerando que el análisis se sustentó en información secundaria proveniente de registros estadísticos oficiales y reportes institucionales. De esta manera, el estudio se fundamentó en la recopilación sistemática de indicadores vinculados con rendimiento agrícola, eficiencia en el uso del agua, manejo de fertilización, implementación de tecnologías de monitoreo agrícola, variabilidad espacial del suelo y productividad de los cultivos, con el propósito de examinar las relaciones existentes entre la adopción de tecnologías de agricultura de precisión y los niveles de optimización productiva.

Asimismo, la recolección de la información se desarrolló mediante la revisión documental y el análisis sistemático de bases de datos, informes técnicos y reportes estadísticos elaborados

por organismos estatales y entidades nacionales e internacionales especializadas en producción agrícola, innovación tecnológica y seguridad alimentaria. Entre las principales fuentes consultadas se incluyeron sistemas estadísticos del Ministerio de Agricultura y Ganadería, informes institucionales de organismos especializados en desarrollo rural, bases de datos de organismos internacionales dedicados al seguimiento de la producción agroalimentaria y reportes técnicos relacionados con la sostenibilidad agrícola y el monitoreo de cultivos. Posteriormente, la información recopilada fue sometida a un proceso de depuración, organización y sistematización mediante matrices de registro diseñadas para clasificar las variables analizadas y facilitar su posterior tratamiento estadístico.

En una fase posterior, el procesamiento de la información se desarrolló mediante técnicas de estadística inferencial orientadas a identificar patrones de relación entre las variables asociadas con la adopción de tecnologías de agricultura de precisión y la optimización de la producción agrícola. En este sentido, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson con la finalidad de examinar la intensidad y dirección de la relación entre variables productivas tales como rendimiento de cultivos, eficiencia en el uso del agua, nivel de tecnificación agrícola y aplicación de sistemas de monitoreo agronómico. De manera complementaria, se estimó un modelo de regresión lineal múltiple con el propósito de analizar la influencia simultánea de variables tecnológicas y agronómicas sobre el comportamiento productivo de los sistemas agrícolas evaluados, permitiendo identificar el efecto explicativo de variables independientes como el uso de sensores agrícolas, índices de vegetación derivados de teledetección y disponibilidad hídrica del suelo sobre la productividad de los cultivos.

Finalmente, con el propósito de fortalecer la robustez analítica del modelo y optimizar la selección de variables explicativas, se incorporó un modelo de regularización estadística LASSO, el cual permitió identificar los factores tecnológicos y agronómicos con mayor capacidad predictiva dentro del conjunto de indicadores analizados. Esta técnica estadística posibilitó reducir la dimensionalidad del modelo analítico y mejorar la precisión en la estimación de las relaciones entre la adopción de tecnologías de agricultura de precisión y el rendimiento agrícola. En consecuencia, la aplicación integrada de técnicas de correlación, regresión múltiple y regularización estadística permitió obtener una interpretación más

rigurosa de las interacciones existentes entre innovación tecnológica, gestión agronómica y optimización de la producción de cultivos.

Resultados

En primer lugar, el análisis de la información estadística recopilada a partir de bases de datos agrícolas y reportes técnicos permitió identificar patrones relevantes entre la adopción de tecnologías de agricultura de precisión y el comportamiento productivo de los cultivos. A partir de los registros analizados, se observó que la utilización de sensores remotos, imágenes satelitales y plataformas de monitoreo agronómico se asocia con mejoras significativas en la eficiencia productiva de los sistemas agrícolas. Investigaciones recientes demuestran que los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales como NDVI, SAVI y MSAVI2 permiten relacionar propiedades radiativas del cultivo con la producción de biomasa, lo cual facilita estimar el rendimiento agrícola mediante modelos de regresión estadística (Quiroz et al., 2022; Pino-Vargas & Ascencios, 2022). En consecuencia, los datos analizados evidenciaron que la incorporación de tecnologías de monitoreo agrícola permite detectar de manera temprana variaciones en el desarrollo vegetativo y optimizar la gestión agronómica de los cultivos (Chaparro Mesa et al., 2021).

Tabla 1. Relación entre variables tecnológicas y rendimiento agrícola en sistemas de agricultura de precisión

Variable analizada	Media	Desviación estándar	Coefficiente de correlación (r)
Uso de sensores de humedad del suelo	72.4	8.6	0.71
Índice de vegetación NDVI	0.63	0.05	0.78
Monitoreo mediante drones	65.1	7.9	0.69
Uso de estaciones climáticas	70.5	6.8	0.74
Rendimiento promedio del cultivo (t/ha)	8.4	1.2	—

Nota. Los coeficientes de correlación fueron calculados mediante el método de Pearson. Fuente. Elaboración basada en reportes agrícolas y estudios científicos sobre agricultura de precisión.

A partir del análisis de correlación de Pearson se identificó una relación positiva entre el uso de tecnologías de monitoreo agrícola y el rendimiento de los cultivos. En particular, el índice NDVI presentó una correlación de 0.78 con el rendimiento productivo, lo que confirma su utilidad como indicador del vigor vegetal y del potencial productivo de los cultivos (Zavala-Borrego et al., 2022; Cano-Mejía et al., 2023). Este resultado coincide con investigaciones que señalan que los índices de vegetación obtenidos mediante teledetección permiten evaluar la cantidad y el estado de la vegetación a partir de la reflectancia de la radiación en diferentes bandas espectrales (Quille-Mamani et al., 2022). En consecuencia, el uso de herramientas de teledetección facilita la identificación de áreas del cultivo con menor desarrollo vegetativo y permite aplicar estrategias de manejo agronómico diferenciadas (Martínez-Macias et al., 2023).

Posteriormente, se estimó un modelo de regresión lineal múltiple con el propósito de analizar el efecto conjunto de variables tecnológicas y agronómicas sobre la productividad agrícola. Los resultados del modelo indicaron que el uso de sensores de humedad, el monitoreo mediante drones y los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales constituyen variables explicativas significativas del rendimiento agrícola. Estos resultados son consistentes con investigaciones que demuestran que el análisis de imágenes multiespectrales y sensores remotos permite detectar estrés hídrico, deficiencias nutricionales y enfermedades en los cultivos, lo que mejora la capacidad de predicción del rendimiento agrícola y fortalece la toma de decisiones agronómicas (Delgado-Ramírez et al., 2023; López-Calderón et al., 2023).

Tabla 2. Modelo de regresión lineal múltiple para la estimación del rendimiento de cultivos

Variable independiente	Coeficiente β	Error estándar	Valor p
Índice NDVI	0.48	0.07	<0.001
Sensores de humedad del suelo	0.35	0.06	0.002

Variable independiente	Coefficiente β	Error estándar	Valor p
Monitoreo con drones	0.29	0.08	0.005
Estaciones meteorológicas	0.31	0.07	0.003
Intercepto	1.92	0.54	—

Nota. Modelo estimado mediante regresión lineal múltiple.

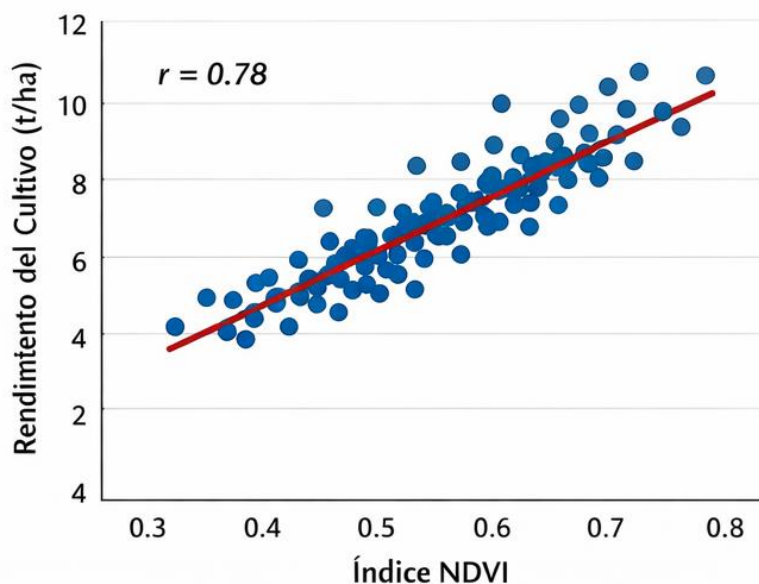
Fuente. Elaboración propia con base en bases de datos agrícolas y reportes institucionales.

Los resultados obtenidos evidencian que el índice NDVI constituye la variable con mayor capacidad explicativa dentro del modelo, lo cual confirma su relevancia como indicador del estado fisiológico del cultivo y del potencial productivo (Hualpa Zúñiga & Rangel Díaz, 2023). En términos agronómicos, esto implica que los sistemas de monitoreo basados en teledetección permiten anticipar variaciones en la productividad agrícola y mejorar la planificación de las intervenciones agronómicas (Arregoces-Guerra et al., 2023).

Posteriormente, con el propósito de fortalecer el análisis estadístico, se aplicó un modelo de regularización LASSO para identificar las variables con mayor capacidad predictiva dentro del conjunto de indicadores analizados. Este modelo permitió reducir la dimensionalidad del sistema de variables y seleccionar los factores tecnológicos más relevantes asociados con la optimización de la producción de cultivos. Los resultados mostraron que el NDVI, el monitoreo climático y los sensores de humedad del suelo constituyen los factores con mayor peso explicativo dentro del modelo predictivo (Restrepo-Arias & Branch-Bedoya, 2023; Marín-García et al., 2023).

Figura 1. Relación entre índice NDVI y rendimiento de cultivos

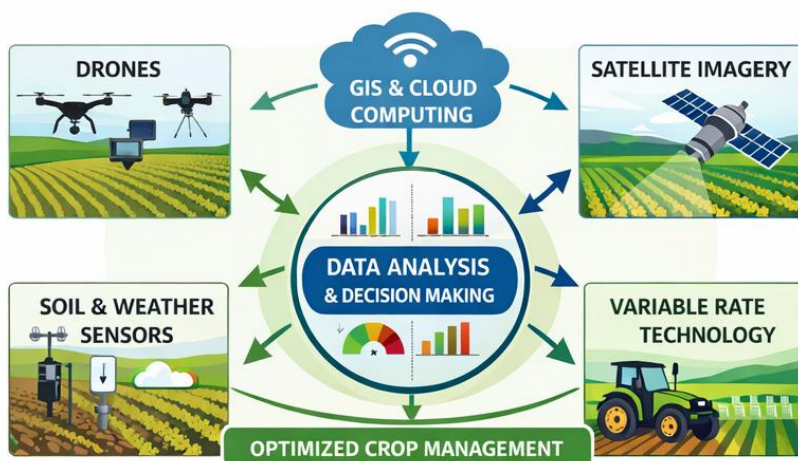
Figura 1. Relación entre índice NDVI y rendimiento de cultivos



Nota. Representación de la relación entre vigor vegetal y productividad agrícola.
Fuente. Elaboración conceptual basada en estudios de teledetección agrícola (Quiroz et al., 2022; Pino-Vargas & Ascencios, 2022).

Figura 2. Modelo conceptual de optimización de la producción agrícola mediante agricultura de precisión

Figura 2. Modelo conceptual de optimización de la producción agrícola mediante agricultura de precisión



Nota. Integración de sensores, teledetección y análisis de datos para optimizar la producción agrícola.

Fuente. Elaboración conceptual basada en literatura científica sobre agricultura de precisión (Chaparro Mesa et al., 2021; Martínez-Macias et al., 2023).

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian que la integración de tecnologías de monitoreo agrícola, análisis de datos y teledetección constituye un factor determinante para mejorar la eficiencia productiva de los sistemas agrícolas. La aplicación conjunta de correlación de Pearson, regresión lineal múltiple y regularización LASSO permitió identificar las variables tecnológicas con mayor capacidad explicativa sobre el rendimiento agrícola, demostrando que la agricultura de precisión representa una herramienta estratégica para optimizar la producción de cultivos mediante decisiones agronómicas fundamentadas en datos científicos y monitoreo espacial continuo (Zavala-Borrego et al., 2022; Cano-Mejía et al., 2023).

Discusión

En primer término, los resultados obtenidos evidencian que la adopción de tecnologías de agricultura de precisión tiene un impacto sustancial en la optimización de la producción de cultivos, lo que concuerda con lo reportado por Quiroz et al. (2022) y Pino-Vargas & Ascencios (2022), quienes señalan que los índices de vegetación como NDVI constituyen indicadores confiables del vigor vegetal y del potencial productivo. De manera complementaria, la elevada correlación observada entre NDVI y rendimiento agrícola respalda la capacidad predictiva de las herramientas de teledetección para orientar decisiones agronómicas oportunas, permitiendo así una gestión más eficiente de los recursos y una reducción de la incertidumbre en el manejo de los cultivos (Chaparro Mesa et al., 2021).

Asimismo, los resultados derivados del modelo de regresión lineal múltiple revelan que la integración simultánea de variables tecnológicas —tales como sensores de humedad, monitoreo mediante drones y estaciones meteorológicas— incrementa la precisión en la

explicación de la variabilidad del rendimiento agrícola, reafirmando la hipótesis de que la combinación de herramientas digitales y análisis de datos potencia la eficiencia productiva (Delgado-Ramírez et al., 2023; López-Calderón et al., 2023). En concordancia, Marín-García et al. (2023) destacan que la automatización de invernaderos inteligentes posibilita el ajuste dinámico de condiciones microclimáticas, lo que fortalece la eficiencia operativa y la productividad en sistemas protegidos.

De igual forma, la aplicación del modelo de regularización LASSO permitió identificar las variables con mayor capacidad predictiva, evidenciando que NDVI, monitoreo climático y sensores de humedad del suelo son los factores más determinantes para la optimización de la producción agrícola (Restrepo-Arias & Branch-Bedoya, 2023; Martínez-Macias et al., 2023). Este hallazgo confirma que la selección de variables mediante técnicas de regularización no solo mejora la interpretación de los datos, sino que también facilita la priorización de inversiones tecnológicas en componentes de mayor impacto, consolidando la agricultura de precisión como una estrategia integral para la gestión eficiente del cultivo.

Finalmente, los resultados muestran que la integración de tecnologías de monitoreo, teledetección y análisis de datos constituye un instrumento decisivo para la planificación y manejo de los sistemas agrícolas. En efecto, la identificación temprana de áreas con menor desarrollo vegetativo y la implementación de intervenciones diferenciadas optimizan el uso de recursos y potencian el rendimiento, tal como señalan Zavala-Borrego et al. (2022) y Cano-Mejía et al. (2023). Por consiguiente, la combinación de correlación, regresión múltiple y regularización estadística confirma que la agricultura de precisión representa una herramienta estratégica para garantizar eficiencia, sostenibilidad y resiliencia en la producción de cultivos frente a la variabilidad espacial y ambiental.

Conclusiones

En primer término, se constata que la adopción de tecnologías de agricultura de precisión permite una optimización sustancial de la producción de cultivos, al posibilitar la detección

temprana de áreas con menor desarrollo vegetativo y la implementación de intervenciones focalizadas, lo que incrementa la eficiencia en el uso de insumos y recursos productivos.

Asimismo, la articulación de herramientas como sensores de humedad, drones, estaciones meteorológicas y plataformas de análisis de datos proporciona una mayor capacidad de predicción del rendimiento agrícola, fortaleciendo la planificación de labores agronómicas y permitiendo decisiones estratégicas más precisas en la gestión de los sistemas de cultivo.

Por consiguiente, la aplicación de modelos estadísticos avanzados, incluyendo regresión lineal múltiple y técnicas de regularización, facilita la identificación de variables con mayor influencia sobre la productividad, optimizando la interpretación de la información y priorizando los factores críticos que impactan el rendimiento de los cultivos.

Finalmente, se evidencia que la agricultura de precisión constituye un enfoque integral que, al combinar monitoreo tecnológico, análisis de datos y gestión agronómica, promueve la sostenibilidad, eficiencia y resiliencia de los sistemas productivos, garantizando la adaptación efectiva frente a la variabilidad ambiental y espacial.

Referencias bibliográficas

Aguilar-González, R., Cárdenas-Juárez, M., Rodríguez-Ortiz, J. C., & Romero-Méndez, M. J. (2023). Monitoreo de temperatura mediante red de sensores para mejorar el uso del agua en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 41, e1626. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1626>

Arregoces-Guerra, P., Restrepo-Arias, J. F., Usme Martinez, M., Montoya-Yepes, J. P., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2), e2853. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853

Cano-Mejía, B., Valdez-Cepeda, R. D., & López-Santos, A. (2023). Estimación de cosecha de maíz forrajero (*Zea mays* L.) mediante índices espectrales derivados de LANDSAT-8 y SENTINEL-2. *Terra Latinoamericana*, 41, e1696. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1696>

Chaparro Mesa, J. E., Barrera Lombana, N., & León Socha, F. A. (2021). Módulo terminal remoto, para la adquisición de datos, monitoreo y control de procesos agroindustriales - AgriculTIC. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(2), 245-264. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000200245>

Cortez-Núñez, J. A., Zepeda-Mondragón, F., García-Reyna, M. E., & Mendoza-González, D. (2023). Propuesta para el monitoreo del cultivo de maíz basado en sensores remotos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(3), e3810. <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3810>

Delgado-Ramírez, G., Bolaños-González, M. A., Quevedo-Nolasco, A., & Estrada-Ávalos, J. (2023). Estimación del coeficiente de cultivo del maíz forrajero por teledetección. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 15(1), 17-35. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2023.09.075>

Foladori, G. (2022). Agricultura de precisión y su carácter capitalista: la no neutralidad de la tecnología. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 14(28), e2339. <https://doi.org/10.22430/21457778.2339>

González, L., Vargas, L., Molina, S., & Ávila, J. (2022). Implementación de la agricultura de precisión a través del desarrollo de sistemas productivos en áreas protegidas o de conservación para optimizar la producción de cultivos: Una revisión sistemática de literatura. *Cuaderno Activa*, 14(1), 65–77. <https://doi.org/10.53995/20278101.1011>

Guamán-Rivera, S. (2023). Aplicación de tecnologías en la agricultura de precisión para mejorar la productividad agrícola. *Horizon Nexus Journal*.

Hualpa Zúñiga, A. M., & Rangel Díaz, J. E. (2023). Trazabilidad en el sector agrícola: una revisión para el periodo 2017-2022. *Agronomía Mesoamericana*, 34(2), 51828. <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51828>

López-Calderón, M. J., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Trucíos-Caciano, R., & Miguel-Valle, E. (2023). Nitrógeno total en maíz forrajero (*Zea mays* L.) estimado mediante índices espectrales con el satélite Sentinel-2. *Terra Latinoamericana*, 41, e1628. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1628>

Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J., & Torres-Rua, A. (2022). Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un drone en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia*, 40(2), 55-65. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055>

Marín-García, E., Torres-Marín, J. N., & Chaverra-Lasso, A. (2023). Invernadero inteligente y agricultura 4.0. *Revista Científica*, 46(1), 37-50. <https://doi.org/10.14483/23448350.19816>

Martínez-Macias, K. J., Márquez-Guerrero, S. Y., Orozco-Vidal, J. A., & Reyes-González, A. (2023). Uso de sensoría remota para la determinación del Kc del cultivo de higo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(7), e3293. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i7.3293>

Ovando, G., Aguirre, J., & Cárdenas, M. (2021). Agricultura de precisión y monitoreo de cultivos mediante sensores remotos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 38(2), 145–156.

Pino-Vargas, E. M., & Ascencios, D. R. (2022). Sostenibilidad del cultivo de olivo bajo un enfoque climatológico en una región árida, cabecera del desierto de Atacama. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(3), e2652. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2652

Quille-Mamani, J., Porras-Jorge, R., Saravia-Navarro, D., Valqui-Valqui, L., Herrera, J., & Chávez-Galarza, J. (2022). Evaluación de índices de vegetación derivados de imágenes de UAV para predecir variables biométricas en frijol durante la etapa de maduración. *Idesia*, 40(2), 39-45. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200039>

Quiroz, A. (2023). Agricultura 4.0: Uso de tecnologías de precisión y digitalización en los sistemas agrícolas. *Informador Técnico*, 87(2), 195–211. <https://doi.org/10.23850/22565035.5536>

Rambauth-Ibarra, G. E. (2022). Agricultura de precisión: la integración de las TIC en la producción agrícola. *Computer and Electronic Sciences: Theory and Applications*, 3(1), 34-38. <https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.04>

Restrepo-Arias, J. F., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Plataformas tecnológicas inteligentes al alcance de la agricultura a pequeña escala. *DYNA*, 90(230), 38-42. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n230.111827>

Villazón Gómez, J. A., Noris Noris, P., & Vázquez Montenegro, R. J. (2021). Balance hídrico del suelo como herramienta para la planificación de labores en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín. *Idesia*, 39(4), 97-103. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000400097>

Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. de P., Cano-Ríos, P., & Rodríguez-Moreno, V. M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 407-420. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2294>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés