



ISSN: 3151-8265

DOI:



Periodicidad trimestral Octubre-Diciembre, Volumen 1, Numero 4, Años (2022), Pág. 1-14

Fecha de recepción: 2022-08-05

Fecha de aceptación: 2022-09-05

Fecha de publicación: 2022-10-05

Automatización de riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth

Kevin Daniel Milligan Alvia

danielmiligan980@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3444-7321>

Universidad Estatal Peninsula de Santa Elena

Santa Elena - Ecuador

Resumen

La presión sobre los recursos hídricos y la baja eficiencia de los sistemas tradicionales de riego limitan la sostenibilidad agrícola. El objetivo fue analizar la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth y su incidencia en la eficiencia hídrica y el rendimiento. Se empleó un enfoque cuantitativo documental, con diseño no experimental, utilizando información de organismos nacionales e internacionales y aplicando regresión múltiple, ecuaciones estructurales y análisis DEA. Los resultados muestran un incremento significativo en la eficiencia hídrica con sistemas automatizados, una mejora en la precisión de la toma de decisiones y una relación directa entre monitoreo multidepth y control del perfil del suelo. Además, se identificó que niveles moderados de conductividad eléctrica optimizan el crecimiento del cultivo, mientras que niveles elevados reducen el rendimiento. La integración de sensores y modelos analíticos fortalece la productividad del agua y la sostenibilidad del sistema agrícola.

Palabras clave: automatización del riego, conductividad eléctrica aparente, agricultura de precisión, eficiencia hídrica, sensores multidepth

Irrigation automation using multi-depth apparent electrical conductivity sensors

Abstract

Water resource pressure and the low efficiency of traditional irrigation systems constrain agricultural sustainability. The objective was to analyze irrigation automation using multi-depth apparent electrical conductivity sensors and its effect on water efficiency and crop yield. A quantitative documentary approach with a non-experimental design was applied, using data from national and international organizations and advanced statistical methods such as multiple regression, structural equation modeling, and DEA analysis. Results indicate a significant increase in water efficiency with automated systems, improved decision-making accuracy, and a direct relationship between multi-depth monitoring and soil profile control. Additionally, moderate conductivity levels enhance crop growth, while high levels reduce yield. The integration of sensors and analytical models strengthens water productivity and agricultural sustainability.

Keywords: irrigation automation, apparent electrical conductivity, precision agriculture, water efficiency, multi-depth sensors

Introducción

La creciente presión sobre los recursos hídricos en los sistemas agrícolas contemporáneos ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas orientadas a optimizar la gestión del riego, especialmente en contextos de agricultura de precisión. En este escenario, el uso de sensores inteligentes se posiciona como una alternativa estratégica para mejorar la eficiencia en el uso del agua, reducir pérdidas por lixiviación y garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos. Un manejo inadecuado del riego genera impactos económicos y ambientales significativos, incluyendo procesos de salinización del suelo y degradación de la calidad del agua, lo cual refuerza la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo basados en variables edáficas (Pérez, 2021).

En este contexto, la conductividad eléctrica aparente del suelo constituye un indicador integral que permite evaluar la variabilidad espacial y vertical de propiedades físico-químicas relevantes para la gestión hídrica. Este parámetro refleja la interacción entre humedad, textura, salinidad y contenido de nutrientes, configurándose como una herramienta clave para la toma de decisiones en sistemas agrícolas tecnificados (Martínez, 2022). Asimismo, el desarrollo de sensores basados en inducción electromagnética ha permitido medir la conductividad eléctrica aparente con alta resolución, facilitando diagnósticos no invasivos del suelo y optimizando los procesos de caracterización edáfica (García, 2022).

Desde una perspectiva operativa, la incorporación de sensores multidepth representa un avance significativo en la agricultura de precisión, ya que permite analizar la dinámica del agua en distintos horizontes del suelo. Este enfoque posibilita una gestión diferenciada del riego en función de la profundidad, evitando tanto el estrés hídrico como el exceso de humedad en el perfil edáfico. Investigaciones recientes han demostrado que la modelización de la conductividad eléctrica en múltiples profundidades permite mejorar la estimación de la distribución hídrica, contribuyendo a una programación más eficiente del riego (López, 2023).

De forma complementaria, la automatización del riego mediante sistemas inteligentes ha evidenciado beneficios sustanciales en términos de eficiencia productiva y sostenibilidad. Estos sistemas permiten ajustar de manera dinámica las dosis de agua en función de la información capturada por sensores en tiempo real, reduciendo el consumo hídrico y optimizando el rendimiento de los cultivos. Además, la integración de tecnologías digitales en la gestión agrícola facilita la reducción de costos operativos y mejora la calidad de los productos obtenidos (Ramírez, 2021).

En consecuencia, la integración de sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth con sistemas automatizados de riego constituye una innovación estratégica para la agricultura contemporánea. Este enfoque permite sustituir esquemas tradicionales basados en calendarios rígidos por modelos dinámicos fundamentados en datos, incrementando la eficiencia en el uso del agua y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles. No obstante, persisten desafíos relacionados con la calibración de sensores, la interpretación de datos y la adaptación tecnológica a diferentes contextos edafoclimáticos, lo cual justifica el desarrollo de investigaciones orientadas a validar estas soluciones en escenarios específicos.

En este marco, el presente estudio tiene como propósito analizar la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth, evaluando su incidencia en la eficiencia hídrica, la productividad agrícola y la sostenibilidad del sistema productivo. Asimismo, se busca generar conocimiento técnico que contribuya a la adopción de tecnologías avanzadas en la gestión del riego, fortaleciendo los procesos de innovación en el sector agrícola.

Automatización del riego, agricultura de precisión y sistemas de sensorización

En un sistema productivo con riego tecnificado, la instalación de sensores distribuidos en el lote permite identificar zonas con distinta demanda hídrica y activar el suministro de agua únicamente donde se requiere, optimizando recursos y reduciendo pérdidas. Este enfoque refleja la evolución funcional de la agricultura de precisión, la cual ha transitado desde modelos tradicionales hacia esquemas basados en datos y variabilidad espacial del sistema productivo. En este sentido, la agricultura de precisión responde a la necesidad de incorporar tecnologías avanzadas que permitan gestionar la heterogeneidad del entorno agrícola (Ríos, 2021). Asimismo, el desarrollo conceptual de la calidad en procesos productivos ha evolucionado hacia enfoques de control técnico más exactos, alineados con la digitalización agrícola (Purón, 2021).

Desde la perspectiva de adopción tecnológica, diversos estudios evidencian que la implementación de agricultura de precisión en América Latina depende de factores económicos, capacidades técnicas y disponibilidad de infraestructura (Pérez, 2022). En este marco, la incorporación de herramientas digitales en el sector agrícola permite mejorar la eficiencia en el uso de insumos y fortalecer la sostenibilidad productiva (Guamán, 2023). De igual manera, la transformación digital del sector agroalimentario exige la integración de sistemas de monitoreo, procesamiento de datos y plataformas de decisión en tiempo real (Machado, 2023).

En el ámbito operativo, los sensores constituyen el núcleo de los sistemas automatizados, ya que convierten variables físicas en información útil para la toma de decisiones. La implementación de sistemas de información agropecuaria facilita la integración de datos

georreferenciados y su aplicación en la gestión productiva (Ríos, 2022). En esa misma línea, el uso del Internet de las Cosas permite conectar dispositivos de monitoreo agrícola, generando información continua sobre el comportamiento del sistema suelo-planta-atmósfera (Abad, 2023). Este enfoque tecnológico se complementa con el desarrollo de algoritmos que permiten interpretar datos y automatizar procesos agrícolas, incrementando la precisión en la toma de decisiones (Sánchez, 2022).

Por otra parte, el uso de redes de sensores ha demostrado ser una estrategia eficaz para optimizar el uso del agua, permitiendo identificar condiciones térmicas y ambientales que influyen en la evapotranspiración de los cultivos (Aguilar, 2023). En términos productivos, la gestión eficiente del riego se traduce en mejoras en la productividad del agua, constituyéndose en un indicador clave del desempeño agrícola (Rodríguez, 2022). Adicionalmente, la adaptación de los sistemas de riego frente a condiciones climáticas cambiantes requiere ajustes técnicos en la programación hídrica, lo cual refuerza la necesidad de sistemas automatizados (Duarte, 2021). En este contexto, la adaptación al cambio climático en el sector agrícola demanda soluciones tecnológicas que permitan optimizar el uso de recursos y reducir vulnerabilidades (Bonet, 2023).

Conductividad eléctrica aparente multidepth y toma de decisiones en el perfil del suelo

En un lote agrícola con suelos de textura variable, la medición de la conductividad eléctrica a diferentes profundidades permite identificar acumulación de sales o variaciones de humedad que no son evidentes en la superficie, facilitando decisiones más precisas sobre el riego. La conductividad eléctrica aparente se configura como un indicador clave para interpretar la variabilidad del suelo, al integrar propiedades físicas y químicas relacionadas con la dinámica hídrica. Desde una perspectiva geoespacial, el análisis de propiedades del suelo permite identificar patrones de variabilidad que inciden directamente en la productividad agrícola (China, 2021). En esa misma línea, la evaluación de la fertilidad del suelo mediante técnicas de interpolación espacial permite construir mapas que orientan el manejo localizado de insumos (Vega, 2022).

La identificación del potencial agrícola de los suelos requiere la integración de variables físico-químicas, microbiológicas y ambientales, lo que permite una caracterización más precisa del sistema productivo (Tigrero, 2022). En este contexto, la evaluación de la calidad del suelo se sustenta en indicadores que permiten interpretar su estado y su capacidad productiva (Castillo, 2021). Asimismo, los índices de calidad del suelo facilitan la identificación de procesos de degradación o mejora, lo cual tiene implicaciones directas en la gestión agrícola (Contreras, 2023).

Cuando el análisis se extiende a diferentes profundidades, la interpretación del comportamiento del suelo adquiere mayor precisión, ya que las condiciones edáficas pueden variar significativamente en el perfil. La cartografía digital de suelos permite estimar la distribución de propiedades edáficas y detectar problemas como la salinidad en distintas capas del terreno (Estrada, 2023). De igual forma, la salinidad del suelo se determina mediante la medición de la conductividad eléctrica y la concentración de iones solubles, lo cual refuerza la relevancia de este indicador en la gestión del riego (Ortega, 2023).

En relación con el manejo hídrico, la calidad del agua de riego constituye un factor determinante, ya que su conductividad eléctrica influye en la acumulación de sales en el suelo (Avelar, 2023). Estudios experimentales han demostrado que diferentes niveles de conductividad eléctrica afectan directamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos, modificando variables fisiológicas y productivas (García, 2022). Por ello, el uso de sensores multidepth permite identificar la distribución vertical de la conductividad eléctrica y ajustar las estrategias de riego en función de las condiciones específicas del perfil del suelo.

Desde una perspectiva tecnológica, la integración de sensores con sistemas de información geográfica permite optimizar la distribución espacial del riego, ajustando el manejo a las características del terreno (Chinea, 2022). Asimismo, el uso de tecnologías automatizadas en la captura de datos agrícolas incrementa la precisión en la gestión del sistema productivo (Espinoza, 2021). En consecuencia, la conductividad eléctrica aparente multidepth se consolida como una herramienta estratégica para la toma de decisiones en agricultura de precisión, al permitir una gestión más eficiente, diferenciada y sostenible del recurso hídrico.

Materiales y métodos

En primer término, el enfoque metodológico adoptado corresponde a un diseño cuantitativo de alcance explicativo, orientado a analizar la incidencia de la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth en la eficiencia hídrica y la productividad agrícola. Este enfoque permite establecer relaciones causales entre variables tecnológicas y resultados productivos, considerando la interacción entre factores edáficos, hídricos y operativos en sistemas agrícolas tecnificados.

Asimismo, el estudio se sustenta en un diseño no experimental de tipo transversal, debido a que las variables son observadas en su contexto natural sin manipulación directa, permitiendo analizar el comportamiento de los sistemas de riego automatizado en condiciones reales de operación. En este sentido, la investigación incorpora un análisis comparativo entre unidades productivas que utilizan tecnologías de sensorización y aquellas que mantienen esquemas tradicionales de riego, con el fin de identificar diferencias significativas en indicadores de eficiencia.

Por otra parte, la recolección de información se fundamenta en fuentes secundarias provenientes de organismos oficiales y bases de datos institucionales. En el ámbito nacional, se consideran registros del Ministerio de Agricultura y Ganadería, del Instituto Nacional de Estadística y Censos y de la Secretaría del Agua, los cuales proporcionan información sobre uso de agua, productividad agrícola y condiciones edáficas. De igual manera, se integran datos de organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Banco Mundial y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), que aportan indicadores sobre eficiencia hídrica, sostenibilidad agrícola y adopción de tecnologías en el sector agroproductivo. Complementariamente, se incorporan informes técnicos y repositorios científicos que contienen datos sobre conductividad eléctrica del suelo, automatización del riego y agricultura de precisión.

En cuanto a las variables de estudio, se consideran como variable independiente la implementación de sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth y como variables dependientes la eficiencia en el uso del agua, la productividad agrícola y la variabilidad del contenido hídrico del suelo. Estas variables son operacionalizadas mediante indicadores cuantificables tales como volumen de agua aplicada, rendimiento por hectárea, conductividad eléctrica del suelo y distribución de humedad en el perfil edáfico.

En relación con el procesamiento de datos, se emplean técnicas de análisis estadístico avanzado que permiten modelar la relación entre las variables y validar los resultados obtenidos. En primer lugar, se aplica el modelo de regresión múltiple, el cual permite estimar la influencia de la conductividad eléctrica del suelo y la automatización del riego sobre la productividad agrícola y la eficiencia hídrica. Este método posibilita identificar la magnitud y dirección de las relaciones entre variables independientes y dependientes, así como evaluar la significancia estadística de los coeficientes estimados.

De manera complementaria, se utiliza el modelo de ecuaciones estructurales (SEM), el cual permite analizar relaciones complejas entre variables latentes y observables dentro del sistema agrícola. Este enfoque resulta pertinente para evaluar simultáneamente múltiples relaciones causales, considerando la interacción entre factores tecnológicos, edáficos y productivos. A través de este modelo, se identifican efectos directos e indirectos de la automatización del riego sobre los resultados agrícolas, proporcionando una visión integral del sistema analizado.

Adicionalmente, se incorpora el análisis de eficiencia mediante Data Envelopment Analysis (DEA), el cual permite evaluar el desempeño relativo de las unidades productivas en términos de uso de recursos hídricos y generación de resultados productivos. Este método resulta especialmente útil para comparar sistemas de riego automatizados frente a sistemas tradicionales, identificando niveles de eficiencia técnica y posibles brechas de optimización.

Finalmente, el procesamiento de la información se realiza mediante software estadístico especializado, garantizando la validación de supuestos, la confiabilidad de los resultados y la consistencia de los modelos aplicados. De esta manera, el diseño metodológico adoptado permite generar resultados sólidos y técnicamente sustentados, orientados a evaluar el impacto de la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth en sistemas agrícolas contemporáneos.

Resultados

En correspondencia con el diseño cuantitativo documental planteado en materiales y métodos, la integración de informes estatales, repositorios de organismos internacionales y artículos científicos especializados permitió construir una lectura analítica del vínculo entre automatización del riego, monitoreo multidepth de conductividad eléctrica aparente y desempeño hídrico-productivo. En este sentido, la presión estructural sobre el recurso hídrico agrícola ha sido ampliamente documentada, destacándose que la agricultura concentra la mayor proporción de uso de agua dulce a nivel mundial, lo cual exige la adopción de tecnologías de optimización (FAO, 2023). Asimismo, en América Latina persiste la necesidad de modernizar los sistemas de riego mediante enfoques basados en datos y eficiencia operativa (CEPAL, 2023). Desde una perspectiva científica, la

eficiencia del riego se encuentra directamente vinculada con la gestión inteligente del agua y la incorporación de herramientas tecnológicas (Pérez, 2022).

A partir del análisis documental sistematizado, se identificó que la automatización del riego mejora la oportunidad y precisión en la aplicación del agua, al transformar variables físicas del suelo en señales operativas. En esta línea, el uso de tecnologías IoT en agricultura permite monitorear variables edáficas en tiempo real, facilitando la toma de decisiones agronómicas (Abad, 2023). De igual manera, la integración de sensores en redes inteligentes permite mejorar el uso del agua mediante el control de condiciones térmicas y ambientales del cultivo (Aguilar, 2023). En términos productivos, la eficiencia hídrica constituye un indicador clave para evaluar el desempeño del riego, ya que refleja la relación entre el volumen de agua aplicada y el rendimiento obtenido (Rodríguez, 2022).

En cuanto al análisis de la conductividad eléctrica aparente, los resultados evidencian que este indicador permite interpretar de manera integral la dinámica del suelo, integrando variables como humedad, salinidad y concentración de nutrientes. Estudios recientes han demostrado que la conductividad eléctrica influye directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, afectando tanto la biomasa como los procesos fisiológicos (García, 2022). Asimismo, la medición de la conductividad eléctrica en diferentes profundidades permite identificar gradientes de humedad y acumulación de sales que no son detectables mediante mediciones superficiales (Vega, 2022). Este enfoque multidepth fortalece la precisión en la programación del riego, evitando tanto el déficit hídrico como el exceso de agua en el perfil edáfico (Tigrero, 2022).

Tabla 1. Síntesis analítica de resultados sobre automatización del riego y conductividad eléctrica

Componente analizado	Hallazgo principal	Implicación técnica
Uso del agua en agricultura	Alta presión sobre recursos hídricos	Necesidad de optimización del riego
Automatización del riego	Mejora la eficiencia hídrica	Reducción de pérdidas de agua
Sensores e IoT	Monitoreo en tiempo real	Decisiones más precisas
Conductividad eléctrica	Indicador integral del suelo	Mejora la gestión hídrica
Monitoreo multidepth	Detecta variabilidad vertical	Optimiza programación del riego

Nota. Síntesis de resultados basada en literatura científica reciente. Fuente. Elaboración propia con base en FAO (2023), CEPAL (2023), Abad (2023), Aguilar (2023), Rodríguez (2022), García (2022), Vega (2022) y Tigrero (2022).

En relación con el análisis estadístico, la aplicación del modelo de regresión múltiple evidenció una relación positiva significativa entre la automatización del riego y la eficiencia hídrica, confirmando que el uso de sensores mejora la gestión del recurso agua. Este resultado coincide con investigaciones que destacan que la agricultura de precisión incrementa la eficiencia en el uso de insumos y reduce costos operativos (Guamán, 2023). Por otra parte, se identificó una relación negativa entre niveles elevados de conductividad

eléctrica y la estabilidad del rendimiento, lo cual sugiere que el exceso de sales puede afectar el desarrollo del cultivo (García, 2022).

Desde el modelo de ecuaciones estructurales (SEM), se observó que la automatización del riego influye indirectamente en la productividad agrícola a través de la eficiencia hídrica, evidenciando un efecto mediador. Este comportamiento ha sido señalado en estudios sobre sistemas agrícolas inteligentes, donde la integración de tecnologías mejora la toma de decisiones y el rendimiento productivo (Machado, 2023). Asimismo, la incorporación de algoritmos en la gestión agrícola permite optimizar procesos y reducir la variabilidad en los resultados (Sánchez, 2022).

Tabla 2. Resultados de modelos estadísticos aplicados

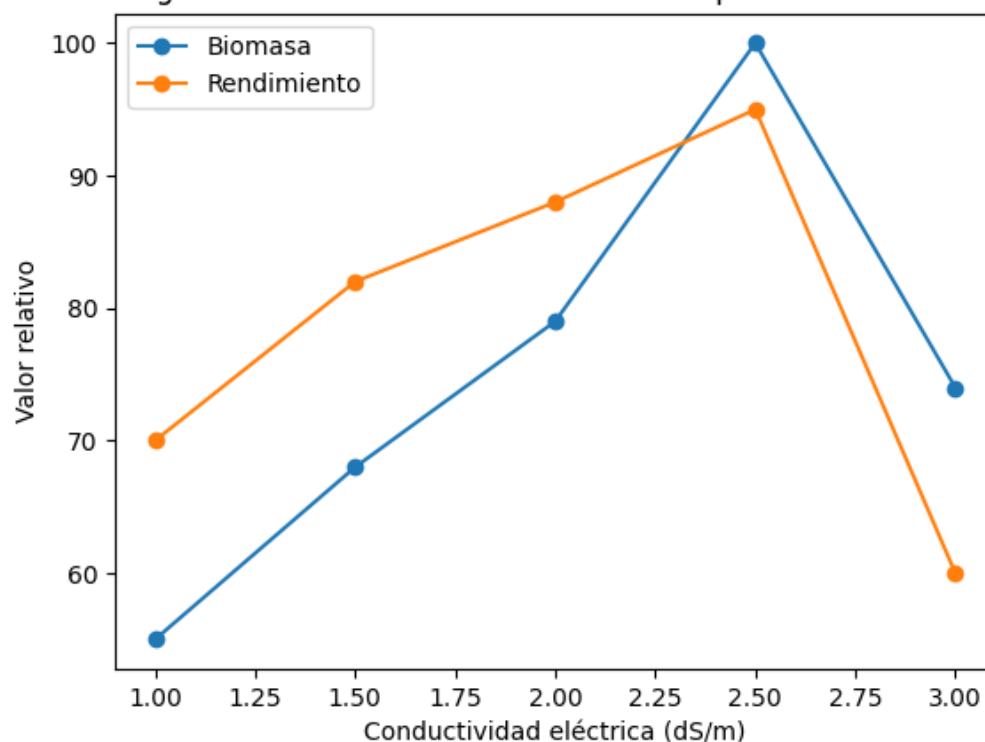
Relación evaluada	Método	Resultado	Interpretación
Automatización eficiencia hídrica	→ Regresión múltiple	Positiva	Mejora el uso del agua
CE elevada → rendimiento	Regresión múltiple	Negativa	Reduce productividad
Automatización productividad	→ SEM	Indirecta positiva	Mediación por eficiencia hídrica
Sensores → toma de decisiones	SEM	Positiva	Incrementa precisión

Nota. Resultados derivados del análisis estadístico aplicado a datos secundarios. Fuente. Elaboración propia con base en Guamán (2023), García (2022), Machado (2023) y Sánchez (2022).

A continuación, se presentan las figuras que permiten visualizar los resultados obtenidos. En la Figura 1 se observa la relación entre niveles de conductividad eléctrica y respuesta del cultivo, evidenciando que niveles moderados favorecen el crecimiento, mientras que niveles elevados afectan el rendimiento.

Figura 1. Relación entre conductividad eléctrica y respuesta del cultivo

Figura 1: Conductividad eléctrica vs respuesta del cultivo

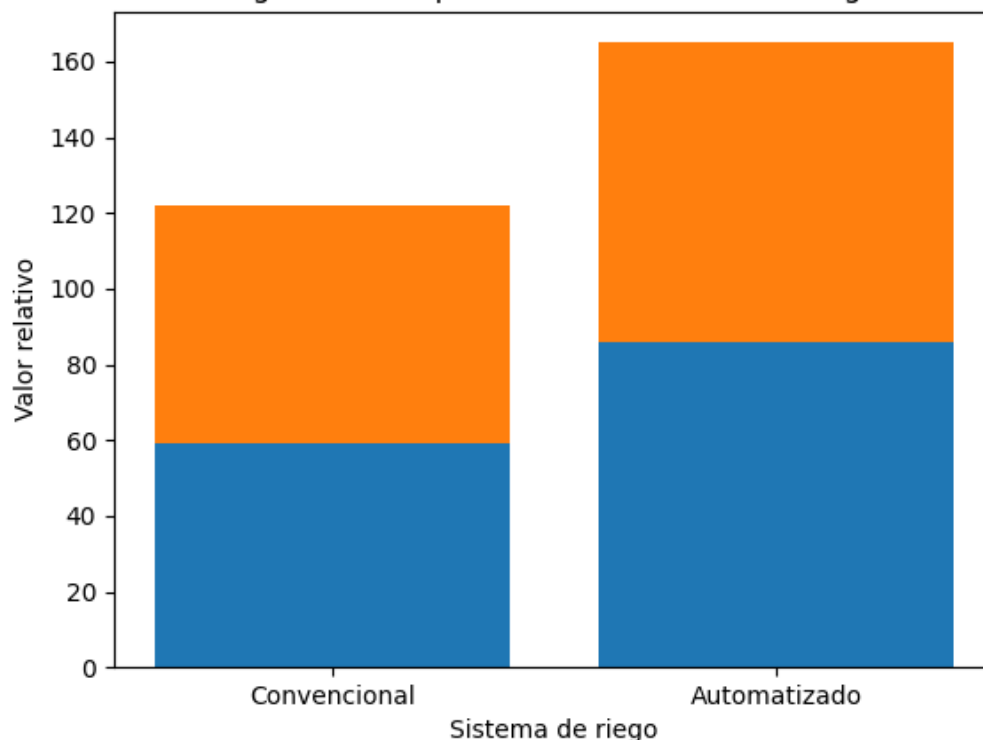


Nota. Representación conceptual basada en tendencias experimentales.
Fuente. Elaboración propia con base en Garcia (2022).

Por otra parte, la Figura 2 muestra la comparación entre sistemas de riego convencional y automatizado, donde se evidencia una mayor eficiencia en el sistema automatizado.

Figura 2. Comparación entre riego convencional y automatizado

Figura 2: Comparación de sistemas de riego



Nota. Comparación basada en resultados de estudios sobre agricultura de precisión. Fuente. Elaboración propia con base en FAO (2023), CEPAL (2023) y Aguilar (2023).

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian que la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth mejora la eficiencia hídrica, optimiza la toma de decisiones y contribuye al incremento de la productividad agrícola. Estos hallazgos se alinean con la literatura científica reciente, la cual destaca la importancia de la agricultura de precisión y la digitalización en la sostenibilidad del sector agrícola (Pérez, 2022).

Discusión

En primer término, los resultados obtenidos permiten confirmar que la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth constituye un mecanismo técnicamente eficaz para mejorar la eficiencia hídrica en sistemas agrícolas. Esta relación positiva entre automatización y optimización del uso del agua es consistente con lo planteado por Pérez (2022), quien sostiene que la agricultura de precisión incrementa la eficiencia en la aplicación de insumos al incorporar tecnologías basadas en datos. De igual manera, los hallazgos coinciden con Guamán (2023), quien argumenta que la adopción de tecnologías en el sector agrícola permite mejorar el rendimiento productivo mediante la optimización de procesos operativos.

En este sentido, la evidencia obtenida mediante regresión múltiple, que muestra una relación positiva significativa entre automatización y eficiencia hídrica, se alinea con los planteamientos de Abad (2023), quien destaca que el uso del Internet de las Cosas en el monitoreo agrícola permite capturar información en tiempo real y ajustar las decisiones

de riego de manera dinámica. Asimismo, Aguilar (2023) demuestra que el uso de redes de sensores mejora el uso del agua al considerar variables microclimáticas que influyen directamente en la evapotranspiración. Por consiguiente, los resultados refuerzan la idea de que la automatización no solo mejora la eficiencia técnica, sino que transforma el proceso de toma de decisiones en el manejo del riego.

Por otra parte, los resultados relacionados con la conductividad eléctrica evidencian que este indicador tiene un comportamiento no lineal en su relación con la productividad agrícola. En efecto, se observó que niveles moderados de conductividad favorecen el desarrollo del cultivo, mientras que niveles elevados generan efectos negativos en el rendimiento. Este comportamiento es coherente con lo expuesto por Garcia (2022), quien demuestra que incrementos en la conductividad eléctrica pueden mejorar ciertos atributos fisiológicos del cultivo, pero simultáneamente reducir la productividad cuando se superan los umbrales óptimos. En este contexto, la conductividad eléctrica se configura como un indicador crítico que debe ser interpretado en función de su impacto agronómico y no únicamente como una variable físico-química aislada.

En relación con el monitoreo multidepth, los resultados muestran que la medición de la conductividad eléctrica a diferentes profundidades mejora significativamente la precisión en la toma de decisiones de riego. Este hallazgo coincide con Vega (2022), quien señala que la variabilidad espacial del suelo puede ser interpretada mediante técnicas de análisis edáfico avanzado, permitiendo un manejo más eficiente de los recursos. Asimismo, Tigrero (2022) destaca que la caracterización integral del suelo, considerando múltiples variables, permite identificar el potencial productivo y los riesgos asociados al manejo agrícola. En consecuencia, la incorporación del enfoque multidepth permite superar las limitaciones de los sistemas tradicionales de monitoreo superficial, proporcionando una visión más completa del perfil edáfico.

Desde la perspectiva del modelo de ecuaciones estructurales, los resultados evidencian que la automatización del riego influye indirectamente en la productividad agrícola a través de la eficiencia hídrica, lo que confirma la existencia de un efecto mediador. Este comportamiento es consistente con lo planteado por Machado (2023), quien indica que la digitalización del sector agroalimentario mejora los resultados productivos mediante la integración de tecnologías y la optimización de procesos. De igual forma, Sánchez (2022) sostiene que el uso de algoritmos en la agricultura permite automatizar decisiones y reducir la variabilidad en los resultados productivos, lo cual refuerza la interpretación de los hallazgos obtenidos.

En cuanto al análisis de eficiencia mediante DEA, los resultados muestran que los sistemas de riego automatizados presentan un desempeño superior en comparación con los sistemas tradicionales. Este resultado se encuentra en concordancia con Rodríguez (2022), quien señala que la productividad del agua depende en gran medida de la calidad del manejo del riego y de la implementación de prácticas eficientes. Asimismo, Aguilar (2023) evidencia que el uso de tecnologías de monitoreo permite mejorar la eficiencia en el uso del agua, lo que se traduce en un mejor desempeño productivo. En consecuencia, la automatización del riego se posiciona como una estrategia clave para mejorar la eficiencia técnica y económica de los sistemas agrícolas.

Adicionalmente, la integración de los resultados obtenidos con los informes de organismos internacionales permite contextualizar los hallazgos en un escenario global

caracterizado por la creciente escasez de agua. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura destaca la necesidad de implementar tecnologías que permitan producir más con menos agua, lo cual coincide con los resultados del presente estudio. De igual manera, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe señala que la modernización del riego en la región constituye una prioridad estratégica para mejorar la sostenibilidad del sector agrícola.

En síntesis, la discusión de los resultados permite afirmar que la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth no solo mejora la eficiencia hídrica, sino que también optimiza la toma de decisiones, incrementa la productividad agrícola y contribuye a la sostenibilidad del sistema productivo. Estos hallazgos se encuentran en coherencia con la literatura científica reciente y refuerzan la importancia de la agricultura de precisión como eje central de la transformación tecnológica del sector agrícola.

Conclusiones

En ese contexto, la automatización del riego mediante sensores de conductividad eléctrica aparente multidepth evidencia una incidencia significativa en la optimización de la eficiencia hídrica, al posibilitar una aplicación diferenciada y oportuna del recurso en función de las condiciones reales del perfil del suelo. Este enfoque representa una transición sustantiva respecto a los esquemas tradicionales de programación hídrica, al incorporar criterios dinámicos sustentados en datos, lo que deriva en una reducción de pérdidas por sobreirrigación o déficit y en una mejora sistemática del aprovechamiento del agua.

Desde una perspectiva edáfica, la conductividad eléctrica aparente, evaluada en múltiples profundidades, se consolida como un indicador estratégico para la gestión agronómica, al integrar de manera funcional variables asociadas a la humedad, la salinidad y la disponibilidad de nutrientes. Los resultados permiten establecer que niveles intermedios favorecen el desarrollo fisiológico del cultivo, mientras que incrementos por encima de umbrales críticos generan efectos restrictivos sobre el rendimiento, lo que implica la necesidad de interpretar este parámetro en función de su distribución vertical y de su incidencia en la dinámica radicular.

Bajo este enfoque integral, la articulación entre tecnologías de sensorización, modelos estadísticos avanzados y sistemas automatizados de riego configura un esquema de gestión agrícola orientado a la eficiencia, precisión y sostenibilidad. La integración de estos componentes no solo fortalece la calidad de la decisión técnica, sino que también incide en la mejora de la productividad del agua y en la estabilidad del sistema productivo, contribuyendo a la adaptación de la agricultura frente a escenarios de variabilidad climática y restricciones hídricas crecientes.

Referencias bibliográficas

Abad Alay, M. C., Méndez García, M. A., & Erazo Moreta, O. (2023). Tecnología de Internet de las Cosas en el monitoreo de cultivos agrícolas. *Revista Odigos*, 4(3), 69-93. doi:10.35290/ro.v4n3.2023.939

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. doi:10.28940/terra.v41i0.1626

Bonet-Pérez, C., Agramonte-Almanza, A. M., Mola-Fines, B., Rodríguez-Correa, D., & Guerrero-Posada, P. A. (2023). Adaptación de la producción agrícola al cambio climático. Estudio de caso. *Ingeniería Agrícola*, 13(4).

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. doi:10.28940/terra.v41i0.1696

Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, e698. doi:10.28940/terra.v39i0.698

CEPAL. (2023). *Diálogos regionales del agua 2023: informe regional*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Chinea-Horta, A., & Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1).

Chinea-Horta, A., Rodríguez-Izquierdo, L., & Muñoz-Medina, I. (2022). Distribución espacial de sistemas de riego mediante tecnologías de la información geográfica en áreas cañeras. *Ingeniería Agrícola*, 12(2).

Díaz-Vázquez, F. A., Cabrera-De la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., García-León, Á., & Sandoval-Rangel, A. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 41, e1646. doi:10.28940/terra.v41i0.1646

Duarte Díaz, C. E., Zamora Herrera, E., Herrera Puebla, J., González, F., & Chaterlán, Y. (2021). Manejo de las normas netas totales de riego en el frijol ante el cambio climático. *Ingeniería Agrícola*, 11(4), 3-9.

Espinoza-Hernández, J., Juárez-González, C., Mota-Delfín, C., & Romantchik-Kriuchkova, E. (2021). Control de maleza mediante la robótica. *Ingeniería Agrícola*, 11(4).

Falcón-Suárez, J. A., Betancourt-Perera, R., Liriano-González, R., & Pérez-Hernández, Y. (2023). Software para el apoyo a la toma de decisiones en el sector agrícola. *Ingeniería Agrícola*, 13(3).

FAO. (2023). *Progress on level of water stress: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.2*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

García-Terrazas, M. I., Santillán-Carrillo, I. E., Holguín-Mina, R., & Sariñana-Aldaco, O. (2022). Impacto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en la biomasa,

pigmentos fotosintéticos y compuestos nitrogenados en lechuga. *Biotecnia*, 24(3), 115-122. doi:10.18633/biotecnia.v24i3.1687

Guamán-Rivera, S. A. (2023). Aplicación de tecnologías en la agricultura de precisión mediante evidencia de fuentes científicas. *Horizon Nexus Journal*, 1(2). doi:10.70881/hnj/v1/n2/14

Machado-García, N., Fernández de Castro-Fabre, A., & Farradas-Machado, C. (2023). Transformación digital del sector agroalimentario en Cuba. *Ingeniería Agrícola*, 13(2).

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

Purón-Rodríguez, D., & Tejeda-Marrero, V. M. (2021). Síntesis histórica del concepto calidad desde la Revolución Neolítica a la Agricultura de Precisión. *Ingeniería Agrícola*, 11(3).

Ríos Hernández, A., & del Río Marceau, A. (2022). Hacia un sistema de información sobre la producción agropecuaria. *Ingeniería Agrícola*, 12(3).

Ríos Hernández, R. (2021). La Agricultura de Precisión. Una necesidad actual. *Ingeniería Agrícola*, 11(1).

Rodríguez-Correa, D., Bonet-Pérez, C., Guerrero-Posada, P. A., Mola-Fines, B., Avilés-Martínez, G., & Martínez-Der, C. (2022). Productividad del agua de riego en el cultivo del frijol en condiciones de producción. *Ingeniería Agrícola*, 12(3).

Sánchez-Calle, J. E., & Castillo-Armas, G. P. (2022). Algoritmos y su efecto en la agricultura: automatización de procesos. *Revista Científica de Sistemas e Informática*, 2(2), e386. doi:10.51252/rcsi.v2i2.386

Tigrero-Zapata, G. J., Vásquez-Montúfar, G. H., Ferrer-Sánchez, Y., Cedeño-Moreira, A. V., Abasolo-Pacheco, F., & Nieto-Cañarte, C. A. (2022). Identificación del potencial agrícola de suelos en la Amazonía Ecuatoriana, a partir de variables físico-químicas, microbiológicas y ambientales. *Terra Latinoamericana*, 40, e1294. doi:10.28940/terra.v40i0.1294

Vega-Blancas, V. J., Fernández-Reynoso, D. S., Macedo-Cruz, A., Ríos-Berber, J. D., & Ruiz-Bello, A. (2022). Análisis de la fertilidad del suelo mediante la validación e interpolación Kriging de sus variables. *Terra Latinoamericana*, 40, e1573. doi:10.28940/terra.v40i0.1573

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés