Arduino-based automated multi-crop system for efficient irrigation management of potatoes and purple corn in La Colpa, Cajamarca.

Dr. Roger Silva Abanto, Cristian Franco Atalaya Alaya, Ner A. Miranda Camacho[3]; Maickol G. Montoya Tocas[4]; Aixa Romero Chávez, Brisa de los Ángeles Colorado Bautista, José E. Solis Quispe[6].

1- 6 Universidad Privada del Norte, Perú roger.silva@upn.edu.pe, *n00329641@upn.pe*, *N00337953@upn.pe*, *N00282418@Upn.pe*, *N00309031@Upn.pe*, *N00340743@Upn.pe*, N00327476@Upn.pe

ABSTRACT— Efficient water resource management is a major challenge for agriculture due to rising water demand and the need to improve crop productivity. In this context, this research aimed to design and implement an Arduino-based automated drip irrigation system to optimize water use for yellow potato (*Solanum tuberosum*) and purple corn (*Zea mays* L.) crops on a 9 m² experimental plot in the La Colpa sector of Cajamarca. The methodology employed a quantitative, applied approach with an experimental design, utilizing capacitive soil moisture sensors, a DHT22 sensor for temperature and relative humidity, a relay module, and a 12 V solenoid valve, all controlled by an Arduino UNO microcontroller. The system continuously monitored soil conditions and automatically activated irrigation when moisture levels fell below the thresholds established for each crop. Results showed a reduction in water consumption from 22.0 L to 16.0 L per week—equivalent to a 27.27% water saving—while maintaining soil moisture within the established thresholds during the evaluation period. It is concluded that Arduino-based irrigation automation represents an efficient, low-cost, and easily implementable technological alternative for optimizing water management and contributing to the development of precision agriculture in small-scale production units.

Keywords: Arduino UNO, agricultural automation, drip irrigation, soil moisture, precision agriculture, water efficiency

Sistema automatizado multi-cultivo basado en Arduino para la gestión eficiente del riego de papa y maíz morado en La Colpa, Cajamarca.

Dr. Roger Silva Abanto, Cristian Franco Atalaya Alaya, Ner A. Miranda Camacho[3]; Maickol G. Montoya Tocas[4]; Aixa Romero Chávez, Brisa de los Ángeles Colorado Bautista, José E. Solis Quispe[6].

1-6 Universidad Privada del Norte, Perú roger.silva@upn.edu.pe, *n00329641@upn.pe*, *N00337953@upn.pe*, *N00282418@Upn.pe*, *N00309031@Upn.pe*, *N00340743@Upn.pe*, *N00327476@Upn.pe*

RESUMEN- La gestión eficiente del recurso hídrico representa uno de los principales desafíos para la agricultura debido al incremento de la demanda de agua y a la necesidad de mejorar la productividad de los cultivos. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema automatizado de riego por goteo basado en Arduino para optimizar el uso del agua en los cultivos de papa amarilla (Solanum tuberosum) y maíz morado (Zea mays L.) en una parcela experimental de 9 m² ubicada en el sector La Colpa, Cajamarca. La metodología empleó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y con diseño experimental, utilizando sensores capacitivos de humedad del suelo, un sensor DHT22 para medir la temperatura y la humedad relativa, un módulo relé y una electroválvula de 12 V controlados mediante un microcontrolador Arduino UNO. El sistema monitoreó continuamente las condiciones del suelo y activó automáticamente el riego cuando la humedad descendió por debajo de los umbrales establecidos para cada cultivo. Los resultados demostraron una reducción del consumo de agua de 22.0 L a 16.0 L por semana, equivalente a un ahorro hídrico del 27.27 %, manteniendo la humedad del suelo dentro de los umbrales establecidos durante el periodo de evaluación. Se concluye que la automatización del riego mediante Arduino constituye una alternativa tecnológica eficiente, de bajo costo y fácilmente implementable para optimizar la gestión del agua y contribuir al desarrollo de la agricultura de precisión en pequeñas unidades productivas.

Palabras clave: Arduino UNO, automatización agrícola, riego por goteo, humedad del suelo, agricultura de precisión, eficiencia hídrica.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye una de las actividades económicas más importantes a nivel mundial y desempeña un papel fundamental en la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible. Sin embargo, el crecimiento de la población y el cambio climático han incrementado la demanda de alimentos y, al mismo tiempo, han generado una mayor presión sobre los recursos hídricos disponibles. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el sector agrícola consume aproximadamente el 70 % del agua dulce utilizada a nivel mundial, por lo que la implementación de tecnologías que permitan optimizar este recurso se ha convertido en una prioridad para lograr una producción agrícola más eficiente y sostenible.

En los últimos años, la agricultura de precisión ha incorporado tecnologías de automatización basadas en sensores, microcontroladores y sistemas inteligentes para monitorear continuamente las condiciones del suelo y del ambiente, permitiendo tomar decisiones de riego de forma automática. Entre estas tecnologías, la plataforma Arduino destaca por ser una alternativa de bajo costo, flexible y de código abierto, ampliamente utilizada en proyectos de automatización agrícola debido a su facilidad de programación, bajo consumo energético y compatibilidad con diversos sensores electrónicos.

En el Perú, la actividad agrícola representa uno de los principales motores económicos, especialmente en las zonas rurales de la sierra. No obstante, gran parte de los pequeños productores continúa utilizando sistemas tradicionales de riego basados en la experiencia del agricultor, sin considerar parámetros técnicos como la humedad real del suelo, la temperatura o la humedad relativa del ambiente. Esta situación ocasiona una distribución ineficiente del agua, incrementa los costos de producción y reduce el rendimiento de los cultivos, afectando directamente la productividad agrícola.

La región Cajamarca presenta condiciones similares. En el sector La Colpa, el cultivo de papa amarilla (*Solanum tuberosum*) y maíz morado (*Zea mays L.*) constituye una importante fuente de ingresos para las familias agricultoras. Sin embargo, el manejo del

riego continúa realizándose de manera empírica, generando problemas de sobre-riego y déficit hídrico que afectan el crecimiento de las plantas, favorecen la aparición de enfermedades radiculares y disminuyen la calidad y cantidad de la producción agrícola.

Frente a esta problemática, la automatización del riego mediante sensores de humedad del suelo y variables ambientales representa una alternativa tecnológica capaz de optimizar el uso del agua. La incorporación de sensores capacitivos de humedad, sensores DHT22 para temperatura y humedad relativa, así como un sistema de control basado en Arduino UNO, permite monitorear continuamente las condiciones del cultivo y activar automáticamente el riego únicamente cuando la humedad del suelo desciende por debajo de los valores previamente establecidos para cada especie agrícola. De esta manera, el sistema busca reducir el riego innecesario y mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico bajo las condiciones evaluadas.

En este contexto, la presente investigación propone el diseño e implementación de un sistema automatizado de riego por goteo basado en Arduino para los cultivos de papa amarilla y maíz morado en una parcela experimental de 9 m² (3 m × 3 m) ubicada en La Colpa, Cajamarca. El sistema integra sensores de humedad del suelo, temperatura y humedad relativa, una electroválvula de 12 V y un módulo de control programado para gestionar el riego de forma automática de acuerdo con las necesidades hídricas de cada cultivo.

El objetivo general de la investigación es diseñar e implementar un sistema automatizado multicultivo basado en Arduino para optimizar la gestión del riego en los cultivos de papa amarilla y maíz morado en La Colpa, Cajamarca, mediante el monitoreo en tiempo real de las condiciones del suelo y del ambiente, contribuyendo al ahorro del recurso hídrico, la mejora de la eficiencia del sistema de riego y el fortalecimiento de la agricultura de precisión en pequeñas unidades productivas.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que permitió medir, registrar y analizar variables numéricas relacionadas con el funcionamiento del sistema automatizado de riego. Entre las variables evaluadas se encuentran la humedad del suelo, la temperatura ambiental, la humedad relativa, el consumo de agua, el tiempo de activación del sistema y la eficiencia del riego en los cultivos de papa amarilla y maíz morado.

La información obtenida mediante los sensores electrónicos fue procesada estadísticamente para evaluar el comportamiento del sistema y determinar su efectividad en la optimización del uso del recurso hídrico.

B. Tipo y nivel de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que tuvo como finalidad resolver un problema real relacionado con el uso ineficiente del agua en la agricultura mediante el diseño e implementación de un sistema automatizado basado en Arduino.

El nivel de investigación corresponde al explicativo, debido a que analiza el efecto de la automatización del riego sobre la eficiencia hídrica de los cultivos, permitiendo establecer la relación entre las variables medidas y el funcionamiento del sistema implementado.

C. Diseño de investigación

El estudio empleó un diseño experimental, debido a que se construyó e implementó un prototipo funcional de riego automatizado para evaluar su desempeño en condiciones reales de operación.

El diseño consistió en comparar el comportamiento del sistema tradicional de riego con el sistema automatizado mediante la medición de indicadores técnicos como:

- Consumo total de agua.
- Humedad del suelo.
- Temperatura ambiental.
- Humedad relativa.
- Tiempo de activación del sistema.
- Frecuencia de riego.
- Ahorro porcentual de agua.

Las mediciones fueron realizadas durante un período continuo de siete días, registrando automáticamente la información generada por los sensores instalados en la parcela experimental.

D. Área de estudio

La investigación se desarrolló en una parcela agrícola experimental ubicada en el sector La Colpa, provincia y departamento de Cajamarca, Perú.

La parcela tuvo una superficie de 9 m² (3 m × 3 m), donde se cultivaron papa amarilla (Solanum tuberosum) y maíz morado (Zea mays L.), implementándose un sistema de riego por goteo automatizado controlado mediante Arduino UNO.

E. Población y muestra

La población estuvo conformada por las parcelas agrícolas dedicadas al cultivo de papa y maíz morado existentes en el sector La Colpa, Cajamarca.

La muestra correspondió a una parcela experimental de 9 m², seleccionada mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la disponibilidad del terreno, facilidad de acceso y condiciones adecuadas para la instalación del prototipo automatizado.

Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo constituida por la parcela experimental donde se implementó el sistema automatizado de riego y se realizaron las mediciones de las variables de estudio.

F. Variables de estudio

Variable independiente

Sistema automatizado de riego basado en Arduino.

Dimensiones

- Monitoreo de humedad del suelo.
- Monitoreo de temperatura ambiental.
- Monitoreo de humedad relativa.
- Control automático del riego.
- Activación de la electroválvula.

Variable dependiente

Eficiencia del riego agrícola.

Indicadores

- Consumo de agua (L).
- Ahorro de agua (%).
- Tiempo de activación del sistema.
- Frecuencia de riego.
- Estabilidad de la humedad del suelo.

G. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de la información se emplearon las siguientes técnicas:

Observación directa

Permitió verificar el estado de los cultivos, el funcionamiento del sistema de riego, la presencia de fugas, obstrucciones y el comportamiento general del prototipo durante las pruebas experimentales.

Monitoreo automatizado

Los sensores electrónicos registraron continuamente la humedad del suelo, temperatura ambiental, humedad relativa y estado de activación del sistema de riego.

Medición manual

Se realizaron verificaciones periódicas del volumen de agua suministrado, tiempo de riego y estado fisiológico de los cultivos utilizando instrumentos de medición convencionales.

H. Materiales y equipos

El prototipo fue construido utilizando los siguientes componentes principales:

- Arduino UNO R3.
- Sensores capacitivos de humedad del suelo.
- Sensor DHT22.
- Módulo relé de un canal.
- Electroválvula de 12 V.
- Sensor de flujo YF-S201.
- Fuente de alimentación de 12 V.
- Regulador LM2596.
- Módulo microSD.
- Módulo RTC DS3231.
- Mangueras para riego por goteo.
- Reservorio de agua.
- Laptop con Arduino IDE.
- Multímetro digital.
- Herramientas de instalación y mantenimiento.

I. Calibración de los sensores y establecimiento de umbrales

Antes de la implementación del sistema de riego, se realizó una calibración de los sensores capacitivos de humedad del suelo con el propósito de estandarizar las lecturas utilizadas por el Arduino UNO. Para ello, se evaluó la respuesta de los sensores en una condición seca, utilizada como referencia de 0 % de humedad, y posteriormente en una condición de saturación con agua, utilizada como referencia de 100 %. Durante estas pruebas se registraron las lecturas entregadas por los sensores y los valores de voltaje correspondientes mediante un multímetro digital. Estas referencias permitieron establecer una escala porcentual de humedad para el procesamiento de las señales por el microcontrolador.

A partir de la escala de referencia obtenida durante la calibración, se establecieron los umbrales operativos de activación del riego en 30 % para la papa amarilla y 35 % para el maíz morado. La selección de estos valores tomó como referencia estudios previos sobre el manejo de la humedad y el agotamiento permisible del agua disponible en cultivos de papa y maíz. En el caso de la papa, en [11] se evaluaron diferentes niveles de agotamiento permisible (15 %, 30 %, 45 % y 60 %), identificando el 30 % como un nivel asociado con una elevada productividad del agua. Para el maíz, en [12] se emplearon un nivel de agotamiento permisible del 35 % para establecer el momento de activación del riego mediante sensores de humedad del suelo. De esta manera, dichos antecedentes fueron considerados como referencia agronómica para definir los umbrales de operación del prototipo. Las lecturas de los sensores fueron posteriormente comparadas con el umbral correspondiente a cada cultivo y, cuando se encontraban por debajo de este valor, el algoritmo activaba la electroválvula. Los porcentajes utilizados corresponden a la escala digital de humedad empleada por el prototipo y no representan directamente el contenido volumétrico de agua (VWC) del suelo, debido a que no se realizó una calibración gravimétrica ni una caracterización físico - química del suelo.

J. Procedimiento experimental

La investigación se desarrolló en ocho etapas.

Etapa 1. Preparación del terreno

Se delimitó una parcela experimental de 3 × 3 m, eliminando maleza y nivelando el terreno para facilitar la distribución uniforme del agua.

Etapa 2. Instalación del sistema hidráulico

Se instaló un reservorio elevado conectado mediante tuberías de polietileno a una red de riego por goteo, incorporando filtro, válvulas y goteros distribuidos uniformemente en la parcela.

Etapa 3. Instalación de sensores

Se ubicaron tres sensores capacitivos de humedad del suelo en diferentes puntos de la parcela para obtener mediciones representativas. El sensor DHT22 fue instalado aproximadamente a 1.5 metros del suelo, protegido de la radiación solar directa y de la lluvia.

Etapa 4. Montaje electrónico

Se integraron todos los componentes electrónicos utilizando Arduino UNO como unidad central de control, conectando los sensores, el módulo relé, la electroválvula y la fuente de alimentación.

Etapa 5. Programación del sistema

Se desarrolló el programa en Arduino IDE para controlar automáticamente el riego. El algoritmo compara las lecturas de los sensores de humedad con los umbrales establecidos para cada cultivo: papa amarilla, menor al 30 %, y maíz morado, menor al 35 %. Debido a que el prototipo utiliza una sola electroválvula para el sector de riego, se empleó una lógica de activación tipo OR: cuando al menos una de las zonas monitoreadas presentó una humedad inferior al umbral correspondiente, el Arduino activó el módulo relé y energizó la electroválvula, iniciando el riego del sector. Por tanto, el prototipo priorizó la atención de la zona que requería agua, aunque la otra zona presentara condiciones de humedad adecuadas. Esta configuración corresponde a una limitación del prototipo inicial, debido a que una única electroválvula no permite controlar de manera independiente el suministro de agua para cada cultivo.

Etapa 6. Pruebas de funcionamiento

Se realizaron pruebas preliminares para verificar el correcto funcionamiento de sensores, conexiones eléctricas, comunicación entre dispositivos y apertura de la electroválvula.

Etapa 7. Monitoreo del sistema

Durante siete días consecutivos se registraron automáticamente los valores de humedad del suelo, temperatura ambiental, humedad relativa, consumo de agua y tiempo de activación del sistema.

Etapa 8. Procesamiento de datos

Los datos registrados fueron organizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel para calcular indicadores de desempeño, elaborar tablas estadísticas, gráficos comparativos y determinar el porcentaje de ahorro de agua alcanzado por el sistema automatizado.

K. Análisis de datos

La información obtenida fue organizada mediante tablas y gráficos estadísticos.

Se calcularon indicadores de eficiencia como:

- Consumo total de agua.
- Consumo promedio por planta.
- Tiempo promedio de activación del sistema.
- Frecuencia de riego.
- Humedad promedio del suelo.
- Temperatura promedio.
- Humedad relativa promedio.
- Porcentaje de ahorro de agua.

Finalmente, se realizó una comparación entre el sistema de riego tradicional y el sistema automatizado para determinar la mejora alcanzada en la gestión eficiente del recurso hídrico.

III. RESULTADOS

A. Configuración del sistema automatizado

El sistema automatizado de riego fue implementado en una parcela experimental de 9 m² (3 m × 3 m) ubicada en el sector La Colpa, Cajamarca. El prototipo estuvo conformado por un microcontrolador Arduino UNO, tres sensores capacitivos de humedad del suelo, un sensor DHT22 para medir temperatura y humedad relativa del ambiente, un módulo relé de un canal, una electroválvula de 12 V y un sistema de riego por goteo.

El algoritmo de control fue programado para monitorear continuamente las variables ambientales y activar automáticamente el riego cuando la humedad del suelo descendía por debajo del umbral establecido para cada cultivo. Para la papa amarilla se definió un umbral de activación de 30 %, mientras que para el maíz morado se estableció un valor de 35 %.

Durante el periodo experimental, el sistema funcionó de manera continua, registrando automáticamente la información obtenida por los sensores y almacenando los datos para su posterior análisis.

B. Registro de variables ambientales

TABLA I

VARIABLES AMBIENTALES REGISTRADAS DURANTE EL PERIODO EXPERIMENTAL

Día	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad del suelo (%)
1	18.5	81	33
2	19.8	79	48
3	20.6	75	29
4	19.4	82	40
5	21.1	74	31
6	17.8	86	75
7	18.9	80	35

Los datos obtenidos muestran una variación normal de la temperatura y la humedad relativa durante el periodo de evaluación. La humedad del suelo presentó fluctuaciones asociadas a las condiciones climáticas y a la activación automática del sistema de riego.

C. Activación automática del sistema

TABLA II

REGISTRO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Día	Humedad del suelo (%)	Estado del sistema	Tiempo de riego (min)
1	33	Activado	22
2	48	Monitoreo	0
3	29	Activado	25
4	40	Monitoreo	0
5	31	Activado	20
6	75	Sin activación	0
7	35	Monitoreo	0

El sistema respondió a las variaciones de humedad registradas en las zonas de cultivo de papa y maíz, considerando los umbrales establecidos de 30 % y 35 %, respectivamente. Las humedades mostradas corresponden al promedio de las zonas evaluadas; por ello, en los días 1 y 5, aunque los promedios fueron de 33 % y 31 %, respectivamente, la activación se produjo debido a que una de las zonas presentó una humedad inferior al umbral correspondiente. En los demás días, el sistema permaneció en monitoreo o sin activación cuando las condiciones de humedad fueron adecuadas, evitando riegos innecesarios.

D. Comparación del consumo de agua

TABLA III

CONSUMO SEMANAL DE AGUA

Sistema	Consumo total (L)	Consumo por planta (L)
Riego tradicional	22.0	2.44
Sistema automatizado	16.0	1.78

La implementación del sistema automatizado permitió disminuir el consumo semanal de agua en comparación con el método tradicional de riego manual, evidenciando una distribución más eficiente del recurso hídrico.

E. Consumo de agua por planta

TABLA IV

DISTRIBUCIÓN SEMANAL DEL CONSUMO DE AGUA

Planta	Tradicional (L)	Automatizado (L)
P1	2.6	2.0
P2	2.4	1.7
P3	2.5	1.8
P4	2.3	1.6
P5	2.6	1.9
P6	2.2	1.5
P7	2.4	1.7
P8	2.5	1.8
P9	2.3	1.6

Los resultados muestran una reducción del consumo de agua por planta durante el periodo de evaluación, en comparación con el método tradicional.

F. Ahorro hídrico obtenido

TABLA V

INDICADORES DE EFICIENCIA DEL SISTEMA

Indicador	Valor
Consumo tradicional	22.0 L
Consumo automatizado	16.0 L
Agua ahorrada	6.0 L
Ahorro porcentual	27.27 %

La implementación del sistema automatizado permitió reducir el consumo de agua en un 27.27 %, debido a que el riego se ejecutó únicamente cuando las condiciones de humedad del suelo lo requirieron.

G. Desempeño del sistema automatizado

Durante los siete días de evaluación, el prototipo registró un funcionamiento estable y continuo. Los sensores enviaron información en tiempo real al Arduino UNO, el cual procesó las señales y controló automáticamente la apertura y cierre de la electroválvula.

El tiempo promedio de activación del sistema fue de 15.4 minutos por evento de riego, mientras que el promedio de humedad del suelo se mantuvo dentro de los rangos establecidos para ambos cultivos. Asimismo, el sistema evitó activaciones innecesarias cuando el suelo presentó niveles adecuados de humedad, demostrando un control eficiente del proceso de irrigación.

Los resultados obtenidos evidencian la viabilidad técnica del sistema automatizado como prueba de concepto a corto plazo, al reducir el consumo de agua durante el periodo de evaluación y responder a las variaciones de humedad del suelo.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la implementación del sistema automatizado de riego evidenciaron una reducción del consumo de agua bajo las condiciones evaluadas. El sistema logró reducir el consumo de agua de 22.0 L a 16.0 L por semana, equivalente a un ahorro del 27.27 %, gracias a la activación automática del riego únicamente cuando la humedad del suelo descendía por debajo de los umbrales previamente establecidos.

Este comportamiento permitió evaluar la respuesta del sistema ante variaciones en la humedad del suelo y reducir activaciones de riego cuando se registraron niveles adecuados. Asimismo, el uso del sensor DHT22 permitió registrar las condiciones ambientales durante el periodo experimental, proporcionando información complementaria para comprender el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en [1], quienes señalaron que los sistemas de riego automatizado basados en sensores de humedad del suelo permiten optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia del riego al suministrar únicamente el volumen necesario para el cultivo. De manera similar, en [3] se concluye que la implementación del riego por goteo automatizado incrementa la eficiencia en el uso del recurso hídrico y reduce considerablemente las pérdidas ocasionadas por evaporación y sobre riego.

En cuanto a la plataforma utilizada, el empleo de Arduino UNO demostró ser una alternativa tecnológica confiable, económica y de fácil implementación. Estos resultados coinciden con los obtenidos en [4], quienes desarrollaron un sistema inteligente de riego basado en Arduino y concluyeron que este tipo de microcontroladores ofrece un adecuado desempeño para proyectos agrícolas de pequeña y mediana escala debido a su facilidad de programación, compatibilidad con diversos sensores y bajo costo de implementación.

Desde la perspectiva de la agricultura de precisión, los resultados también guardan relación con lo

expuesto en [5], quienes sostienen que la automatización agrícola representa una herramienta fundamental para incrementar la productividad y promover un uso más eficiente de los recursos naturales mediante la integración de sensores, sistemas embebidos y tecnologías digitales.

Durante el desarrollo del proyecto se observó que el sistema respondió correctamente a las variaciones de humedad del suelo, activando la electroválvula únicamente cuando fue necesario. Este comportamiento permitió mantener condiciones de humedad más estables durante el periodo experimental y reducir la intervención manual del operador. Además, el registro automático de datos facilita el seguimiento continuo del comportamiento del sistema y proporciona información útil para la toma de decisiones en futuras campañas agrícolas.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones. La evaluación se realizó en una parcela experimental de 9 m² y durante un periodo de siete días, por lo que los resultados obtenidos corresponden a condiciones controladas de pequeña escala. Asimismo, factores como la variabilidad del suelo, las precipitaciones, la radiación solar y las condiciones climáticas propias de cada temporada pueden influir en el desempeño del sistema cuando se implemente en áreas agrícolas de mayor extensión.

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar el periodo de evaluación durante todo el ciclo vegetativo de los cultivos e incorporar tecnologías de comunicación inalámbrica, como módulos Wi-Fi o IoT, que permitan monitorear el sistema en tiempo real mediante aplicaciones móviles o plataformas web. Asimismo, sería conveniente integrar sensores adicionales de pH, conductividad eléctrica y radiación solar para mejorar la precisión del sistema y fortalecer las estrategias de agricultura inteligente.

VI. CONCLUSIONES

1. Se diseñó e implementó satisfactoriamente un sistema automatizado de riego por goteo basado en Arduino UNO para los cultivos de papa amarilla y maíz morado en una parcela experimental de 9 m² ubicada en el sector La Colpa, Cajamarca. La integración de sensores de humedad del suelo, temperatura y humedad relativa permitió automatizar el proceso de riego bajo las condiciones evaluadas.

2. El sistema monitoreó en tiempo real las condiciones del suelo y del ambiente, activando automáticamente la electroválvula cuando la humedad del suelo descendió por debajo de los umbrales establecidos (30 % para papa amarilla y 35 % para maíz morado). “Este mecanismo permitió mantener la humedad del suelo dentro de los rangos establecidos durante el periodo de evaluación, reduciendo la necesidad de intervención manual.

3. La implementación del sistema automatizado permitió reducir el consumo semanal de agua de 22,0 L a 16,0 L, obteniendo un ahorro hídrico del 27,27 % respecto al método tradicional. Este resultado evidencia la viabilidad técnica del prototipo como prueba de concepto a corto plazo para automatizar el riego y reducir el consumo de agua bajo las condiciones evaluadas.

4. El empleo del sensor DHT22 proporcionó información sobre la temperatura y la humedad relativa del ambiente, complementando el monitoreo de las condiciones de cultivo y permitiendo comprender mejor el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones ambientales.

5. Los resultados obtenidos evidencian que la utilización de tecnologías de bajo costo basadas en Arduino constituye una alternativa viable para pequeños productores agrícolas, debido a su facilidad de implementación, bajo costo de mantenimiento y capacidad para automatizar el riego y reducir el consumo de agua bajo las condiciones evaluadas.

6. Finalmente, se concluye que el sistema desarrollado representa una solución tecnológica aplicable a la agricultura de precisión, con potencial para ser escalado a parcelas de mayor tamaño e integrado con tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), plataformas de monitoreo remoto y sensores adicionales que permitan fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico.

7. La prueba de concepto permitió verificar el funcionamiento del sistema automatizado durante siete días en una parcela experimental de 9 m². Sin embargo, el uso de una sola electroválvula limita el control independiente del riego entre los cultivos. Por ello, futuras versiones podrían incorporar líneas y válvulas independientes para cada zona de cultivo y ampliar el periodo de evaluación durante todo el ciclo vegetativo.

REFERENCIAS

[1] O. Adeyemi, I. Grove, S. Peets, Y. Domun, and T. Norton, "Dynamic irrigation scheduling using soil moisture sensors and weather data," *Agricultural Water Management*, vol. 245, Art. no. 106579, 2021.

[2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging Automation in Agriculture for Transforming Agrifood Systems*. Rome, Italy: FAO, 2022.

[3] R. Kumar, M. Singh, and P. Kumar, "Performance evaluation of drip irrigation system for improving water use efficiency," *Irrigation Science*, vol. 38, no. 5, pp. 457–467, 2020.

[4] A. Kurniawan, S. Nugroho, and R. Setiawan, "Design of smart irrigation system based on Arduino," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 794, no. 1, Art. no. 012134, 2021.

[5] R. R. Shamshiri, C. Weltzien, I. A. Hameed, I. J. Yule, T. E. Grift, S. K. Balasundram, et al., "Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 1–14, 2021.

[6] World Bank, *Water in Agriculture: Improving Water Use Efficiency*. Washington, DC, USA: World Bank Group, 2021.

[7] Arduino, "Arduino UNO Rev3 – Technical Specifications," Arduino Documentation, 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3

[8] DFRobot, "Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 User Manual," DFRobot Documentation, 2023. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193

[9] Aosong Electronics, "DHT22 (AM2302) Temperature and Humidity Sensor Datasheet," Guangzhou Aosong Electronics Co., Ltd., 2022.

[10] A. J. Pérez and L. Rodríguez, "Smart irrigation systems for sustainable agriculture: A review," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 190, Art. no. 106427, 2021.

[11] S. I. ul Hassan, M. Akram, H. Habib, M. Imran, M. N. Ahsan, and T. Mehmood, "Evaluation of different moisture depletion levels for water productivity, yield and tuber size of potato under drip irrigation," Journal of Horticultural Science and Technology, vol. 3, no. 4, pp. 105–108, 2020, doi: 10.46653/jhst2034105.

[12] J. F. Da Cunha Leme Filho, B. V. Ortiz, K. S. Balkcom, D. Damianidis, T. J. Knappenberger, and M. Dougherty, "Evaluation of two irrigation scheduling methods and nitrogen rates on corn production in Alabama," International Journal of Agronomy, vol. 2020, Art. no. 8869383, 13 pp., 2020, doi: 10.1155/2020/8869383