

Internet of Things Based Environmental Variables Monitoring System for Greenhouse Crops

David Camilo Ayala Marín, Ingeniero Electrónico¹, Jorge Garzón, Magíster en Ingeniería², Juan Acevedo, Magíster en Ingeniería de Software³

^{1,2,3}Universidad Católica de Oriente, Colombia, david.ayala8603@uco.net.co, jgarzon@uco.edu.co, jacevedo@uco.edu.co

Abstract- *This work aims to describe the development and implementation of a remote monitoring system for environmental variables in greenhouse crops using Internet of Things (IoT) technologies. A four-layer architecture was designed, composed of four sensing nodes based on the ESP32 microcontroller. These nodes can measure relative humidity, ambient temperature, and light intensity, and wirelessly transmit these variables to a central gateway implemented on a Raspberry Pi 4. The gateway then forwards the data to a web platform for visualization. Ambient temperature was observed to range between 13 °C and 29 °C, relative humidity remained above 50%, and solar radiation during peak hours ranged from 4,000 to 12,000 lux. The system proved to be a viable and easily implemented solution for Agriculture 4.0, providing valuable information for making decisions regarding the most favorable growing conditions.*

Keywords- *Precision agriculture, aeroponic cultivation, remote monitoring, monitoring platform, wireless sensor network.*

Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales Basado en Internet de las Cosas para Cultivos Bajo Invernadero

David Camilo Ayala Marín¹ , Jorge Garzón² , Juan Acevedo³ 

^{1,2,3}Universidad Católica de Oriente, Colombia, david.ayala8603@uco.net.co, jgarzon@uco.edu.co, jacevedo@uco.edu.co

Resumen- El presente trabajo tiene como objetivo describir el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo remoto de variables ambientales para cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías basadas en internet de las cosas (IoT). Se diseñó una arquitectura de cuatro capas compuesta por cuatro nodos de sensado, basados en el microcontrolador ESP32, con la capacidad de medir humedad relativa, temperatura ambiente e intensidad lumínica, y transmitir estas variables de forma inalámbrica a un gateway central, implementado en una Raspberry Pi 4, el cual los reenvía a una plataforma web para su visualización. Se observó que la temperatura ambiente osciló entre los 13 °C y los 29 °C, la humedad relativa se mantuvo por encima del 50 % y la radiación solar en horas de máxima intensidad estuvo entre 4.000 y 12.000 Lux. El sistema demostró ser una solución viable y de fácil implementación para la Agricultura 4.0, aportando información de gran utilidad para tomar decisiones relacionadas con las condiciones más favorables para el cultivo.

Palabras clave- Agricultura de precisión, cultivo aeropónico, monitoreo remoto, plataforma de monitoreo, red de sensores inalámbricos.

I. INTRODUCCIÓN

Existen múltiples variables que se deben tener en cuenta al establecer un cultivo, entre ellas el pH y la conductividad eléctrica, que son de gran importancia y varían su nivel ideal dependiendo de la planta a cultivar [1]. Sin embargo, estas variables presentan cambios progresivos en lugar de variaciones abruptas, en la mayoría de los casos; por el contrario, variables como la intensidad lumínica, la humedad y la temperatura ambiente van cambiando según el entorno y la hora del día, especialmente en el trópico, aumentando por ello su necesidad de monitoreo, ya que están entre las primeras cuatro variables que son elegidas por los investigadores para monitorear en la agricultura [2].

Internet de las cosas (IoT) es la conexión de cosas, como sensores o microcontroladores con identificadores únicos, que tienen la capacidad de compartir información con otras cosas, haciendo que estén disponibles en cualquier momento y en cualquier lugar; por otro lado, las redes de sensores inalámbricos (WSN) son un conjunto de dispositivos de sensado que colaboran para intercambiar información y transmitir dicha información a un servidor [3]. Estas tecnologías, actualmente son usadas en el sector agrícola para administrar cultivos de manera precisa, aumentar y estimar la producción, componiendo así una agricultura de precisión o, mejor aún, una agricultura 4.0 [4].

Si bien los términos agricultura de precisión y agricultura 4.0 son aparentemente iguales, tienen diferentes alcances. El primero, hace referencia a un conjunto de tecnologías que pueden ser aplicadas en la producción agrícola para la toma de decisiones y su acertada ejecución [5]; el segundo, recoge la esencia del primero, pero contempla toda la cadena de valor, desde el agricultor a la distribución, conectado a través de internet para coordinar y compartir información, sin dejar de lado la experiencia del consumidor [6]. En síntesis, ambas definiciones resaltan el papel de las tecnologías en la optimización de la actividad agrícola.

En Colombia ya se ha llevado a cabo la integración de tecnologías en el sector agrícola, como prueba de ello está el trabajo de Botero et al. [7], que desarrollaron una estación climática con la capacidad de medir humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar, presión atmosférica, precipitaciones y CO₂, dando la posibilidad de transmitir la información obtenida de los sensores por medio de protocolo Wi-Fi o 3G, usando el MCU Argon Wi-Fi o Boron 2G/3G, dependiendo del método de transmisión inalámbrica; o el de Amaya et al. [8] que usaron una arquitectura de red de sensores, basada en internet de las cosas, capaz de medir humedad relativa, temperatura ambiente, conductividad eléctrica y pH en un cultivo de fresas, con la posibilidad de transmitir los datos de forma inalámbrica con la ayuda del sistema de comunicación General Packet Radio Service (GPRS) y el protocolo de empaquetado TCP/IP.

En el ámbito internacional, Gsangaya et al. [9] desarrollaron un sistema para monitorear de forma remota variables medioambientales (humedad relativa, temperatura ambiente, radiación solar y humedad del suelo) en un cultivo, y poder proporcionar a los administradores alertas e información acerca de las condiciones de este usando un Arduino y un módulo ESP8266 y el protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT); Sadek y Shehata [10] implementaron un invernadero inteligente basado en tecnologías IoT con la capacidad de medir humedad relativa, temperatura ambiente, intensidad lumínica y sólidos disueltos con la ayuda de un Arduino y un módulo Wi-Fi, para transmitir los datos a un microcomputador de modelo B, las variables leídas activaban o desactivaban unos actuadores que controlaban el ambiente en el invernadero según los parámetros de la planta a cultivar.

Finalmente, Ahmad et al. [11] desarrollaron un sistema de monitoreo basado en una red de sensores inalámbricos con la capacidad de medir la humedad del sustrato, humedad relativa, temperatura ambiente, índice de rayos UV y calidad del aire en cultivos, donde cada nodo de sensado estaba compuesto por un Arduino UNO, que se encargaba de realizar la lectura de los sensores, y un módulo Xbee, para transmitir los datos de forma inalámbrica a un servidor, que finalmente mandaba los datos, con la ayuda de un ESP8266, a un ordenador en el cual se podía visualizar la información obtenida.

A pesar de los avances en la implementación de tecnologías IoT y redes de sensores en el sector agrícola, la adopción de estas herramientas por parte de pequeños y medianos productores en Colombia sigue siendo limitada. Factores como la falta de conectividad, la escasa alfabetización digital y, especialmente, la ausencia de soluciones tecnológicas accesibles y económicas dificultan su integración en los esquemas de agricultura de precisión. A 2022 solo el 31% del sector agro utilizaba tecnologías para actividades de asistencia técnica o producción, lo que evidencia una brecha significativa en la digitalización del agro colombiano [12].

Esto no solo limita las posibilidades de mejorar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad de los cultivos, sino que también deja a una parte importante del sector agrícola (especialmente los productores de mediana y baja escala) al margen de los beneficios que ofrece la Agricultura 4.0. A partir de esta realidad, se identifica un vacío claro: la falta de sistemas tecnológicos específicos, de bajo costo y fácilmente implementables, que respondan a las necesidades de monitoreo ambiental en cultivos, adaptados al contexto colombiano.

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de variables ambientales (humedad relativa, temperatura ambiente e intensidad lumínica) para cultivos bajo invernadero haciendo uso de tecnologías IoT, con el fin de proporcionar información que facilite una toma de decisiones más informada por parte del productor. Además, esta investigación busca aportar una solución concreta al problema de acceso y adaptación tecnológica, promoviendo herramientas que sean viables, útiles

y pertinentes para agricultores que hoy están excluidos del proceso de la transformación digital en el agro.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Generalmente, la arquitectura de un proyecto IoT se basa en capas, donde el número de estas varía dependiendo el nivel al que se quiere llegar con el proyecto y su aplicación. Según Singh y Singh [13] la arquitectura de un proyecto IoT puede tener hasta cinco capas:

1. Capa de percepción: es donde se localizan dispositivos como sensores, microcontroladores, cámaras, entre otros, y se encarga de recolectar información física del entorno.
2. Capa de red: se encarga de transmitir la información de los dispositivos IoT al núcleo (o servidor) central y en ella se localizan tecnologías y protocolos de transmisión como Wi-Fi, LoRa, Zigbee, etc.
3. Capa intermedia: esta capa trabaja como un intermediario entre la capa de percepción y la capa de aplicación, maneja el preprocesamiento de la información y protocolos de transmisión. Los componentes de esta capa aseguran que la información de diversos dispositivos pueda ser estandarizada antes de entrar a la capa de aplicación.
4. Capa de aplicación: es un conjunto de elementos de software que hacen uso de la información recolectada por los dispositivos IoT.
5. Capa de negocio: hace uso de sistemas empresariales y bases de datos, en ella se define cómo se usa la información obtenida para tomar decisiones en cuanto al sistema.

Aunque se definen cinco capas, no siempre se usan todas, pues todo depende de la finalidad del proyecto. Por ejemplo, Bing [14] en su trabajo desarrolló un sistema de monitoreo basado en una arquitectura IoT de tres capas: capa de percepción, capa de transporte (anteriormente definida como capa de red) y capa de aplicación.

En el sistema que se desarrolló se optó por el uso de una arquitectura IoT de cuatro capas, que se expresan gráficamente en la Figura 1 y posteriormente se detallan.

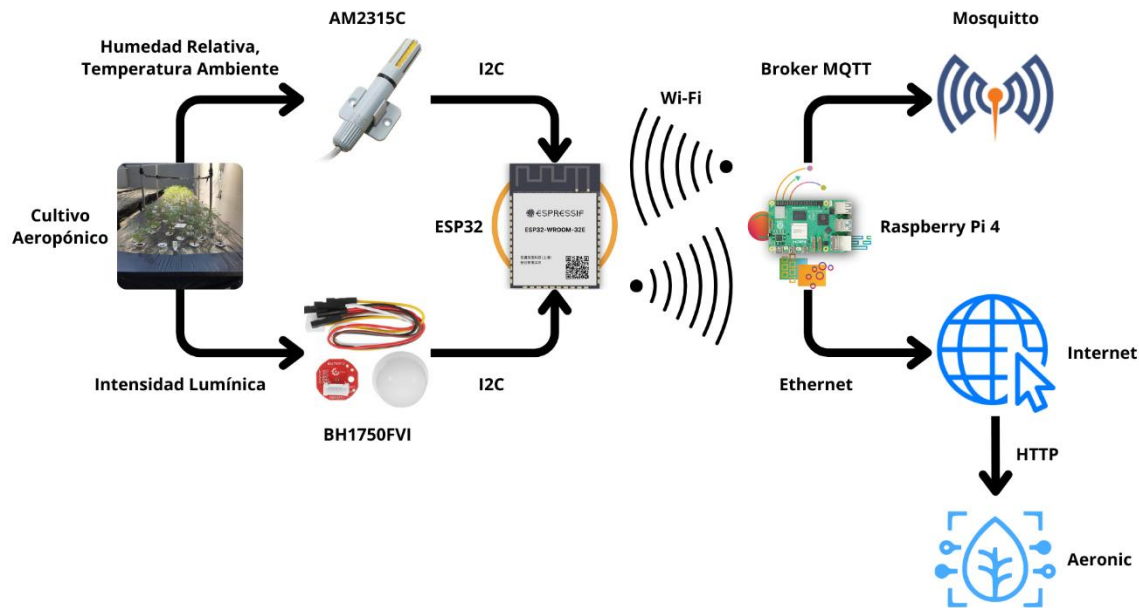


Fig. 1 Arquitectura del proyecto.

1. Capa de percepción: dado que el objetivo es monitorear las variables medioambientales que tienen influencia en el crecimiento de las plantas bajo invernadero, se optó por medir la humedad relativa, la temperatura ambiente y la intensidad lumínica. Para la toma de las variables mencionadas se usaron los sensores AM2315C (sensor de temperatura ambiente y humedad relativa) y BH1750FVI (sensor de intensidad lumínica), los cuales son gestionados por un microcontrolador ESP32.
2. Capa de red: en esta capa se hizo uso de la tecnología Wi-Fi, que viene integrada en el ESP32, esto con el fin de transmitir la información de forma inalámbrica a un servidor central.
3. Capa intermedia: se optó por el uso de una Raspberry Pi 4 como el gateway de la WSN, la cual se encarga de enviar la información recibida de los nodos de sensado a una plataforma web por medio del protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol).
4. Capa de aplicación: se usó una plataforma propia, denominada Aeronic, donde se crearon los nodos de sensado virtual en los cuales se presenta la información de las variables elegidas.

Los sensores utilizados en el proyecto se eligieron con base en criterios de precisión, fiabilidad, facilidad de integración con el microcontrolador, y condiciones de protección para su uso en ambientes agrícolas bajo invernadero.

En el caso del sensor AM2315C, se optó por este modelo debido a que se trata de un sensor capacitivo digital con mejor precisión en la medición de humedad relativa y temperatura ambiente, en comparación con opciones más económicas como

el DHT11 o el DHT20. Además, el AM2315C cuenta con un encapsulado que proporciona una mejor protección contra la humedad y el polvo, lo que lo hace más adecuado para entornos con alta humedad ambiental, como la de los invernaderos.

Por otra parte, el sensor BH1750FVI fue seleccionado debido a que, entre los sensores de intensidad lumínica evaluados, fue uno de los pocos que contaba con una protección adecuada del componente, evitando la exposición directa del circuito integrado a condiciones ambientales adversas. Este aspecto es relevante considerando la necesidad de durabilidad y estabilidad en las lecturas dentro del ambiente de un cultivo bajo invernadero.

El protocolo elegido para la transmisión de los datos gestionados por el ESP32 hacia el gateway fue el MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), ya que permite a los dispositivos mantener una comunicación uno a uno, uno a muchos o muchos a muchos, usando el modelo de publicar/suscribir para la transferencia entre dispositivos [15] y es el segundo mejor protocolo en términos de consumo energético [16].

Por último, se tiene la plataforma Aeronic, que permite la creación de dispositivos virtuales y paneles de visualización (dashboards) personalizados, facilitando así el monitoreo remoto de las variables por parte del agricultor desde cualquier dispositivo con acceso a internet. La plataforma es accesible desde el siguiente enlace: <https://aeronic.herokuapp.com/>, y en ella se pueden ver las variables sensadas (ver Figura 2).



Fig. 2 Plataforma Aeronic.

III. RESULTADOS

El sistema diseñado fue puesto a prueba desde septiembre del año 2024 en un cultivo aeropónico de zanahorias, ubicado en un invernadero de la Universidad Católica de Oriente en Rionegro (Antioquia), en donde los cuatro nodos de sensado fueron instalados a lo largo del cultivo, al nivel de la cama aeropónica, así como se muestra en la Figura 3.



Fig. 3 Nodos de sensado instalados a nivel de la cama aeropónica.

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran las medidas de temperatura, humedad e intensidad lumínica tomadas por una de las cuatro estaciones en una semana.

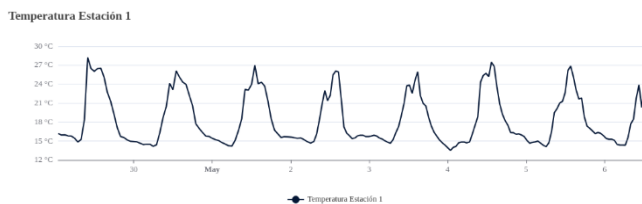


Fig. 4 Gráfico de temperatura en Aeronic.

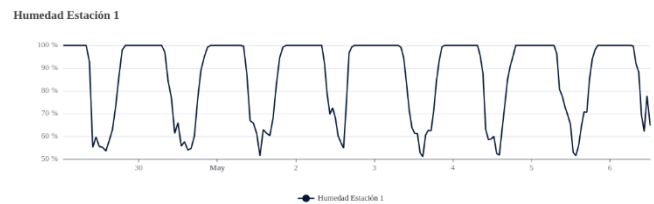


Fig. 5 Gráfico de humedad en Aeronic.

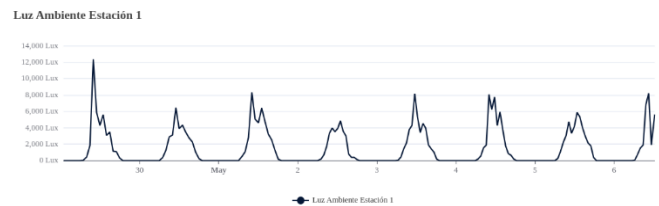


Fig. 6 Gráfico de intensidad lumínica en Aeronic.

En los gráficos tomados de la plataforma Aeronic es posible visualizar los patrones de comportamiento de las variables ambientales en el cultivo, ver sus puntos máximos y mínimos, para determinar si estos valores están dentro de los rangos esperados para el crecimiento adecuado de la planta o si hay que intervenir.

A continuación, se hace un análisis segregado por cada una de las variables:

- Temperatura ambiente: la temperatura mínima está alrededor de los 13°C durante la madrugada, aumentando progresivamente hasta llegar a un máximo de 28°C al mediodía.
- Humedad relativa: los niveles se mantienen cercanos al 100% durante la madrugada, comenzando a descender progresivamente hasta alcanzar valores mínimos cercanos al 52% hacia el mediodía.
- Intensidad lumínica: los niveles de luz comienzan a aumentar gradualmente desde las 06:00 a.m., alcanzando picos significativos entre las 09:00 y 10:30 a.m., con un

valor máximo cercano a los 12.000 Lux. Vale la pena destacar, que esta variable es más sensible a datos atípicos, debido a que en los alrededores del invernadero hay numerosos árboles que proporcionan sombras que van cambiando de posición a lo largo del día.

En comparación con otros trabajos, este desarrollo se enfocó en un conjunto más específico, pero esencial de variables ambientales, especialmente aquellas que tienen un impacto directo en el crecimiento de las plantas en un entorno como el de un invernadero; a diferencia del sistema de Botero et al. [7], que por ejemplo incluye variables como velocidad del viento y precipitaciones (más relevantes en cultivos a cielo abierto), que en este caso se descartaron por no tener relevancia en un ambiente cerrado. Esta selección de variables permite simplificar el sistema, reducir costos y centrar el monitoreo en parámetros realmente determinantes para este tipo de cultivos bajo invernadero.

Por otro lado, comparándolo con los desarrollos de Amaya et al. [8] y Ahmad [11], el sistema propuesto privilegia un enfoque de bajo costo, utilizando la conectividad Wi-Fi integrada en los microcontroladores ESP32; que si bien reduce

significativamente la complejidad y el precio del sistema, implica una limitación importante en términos de alcance, en comparación con las tecnologías Xbee y GPRS, usadas respectivamente por los autores antes citados.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La validación de los datos obtenidos por el sistema desarrollado se llevó a cabo mediante comparaciones con mediciones manuales, utilizando instrumentos de referencia; este proceso consistió en la recolección manual de lecturas para cada una de las variables monitoreadas.

Para la medición de la intensidad lumínica se empleó el luxómetro UT383, mientras que para la temperatura ambiente y la humedad relativa se utilizó el dispositivo HTC-2. La jornada de validación consistió en la toma manual de lecturas cada veinte minutos, iniciando a las 8:50 a.m. y finalizando a las 12:50 p.m., con una duración total de cuatro horas.

Las lecturas obtenidas durante este proceso y las tomadas por el sistema de monitoreo se consignan en la Tabla 1.

Tabla 1: Lecturas de validación y lecturas del sistema de monitoreo.

Hora	Temp. (°C)	Humedad (%)	Luminosidad (Lux)	Temp. (°C)	Humedad (%)	Luminosidad (Lux)
	Lecturas de validación			Lecturas del sistema de monitoreo		
8:50	20	85	911	18	90	853
9:10	18	84	2100	19	87	1900
9:30	24	77	5100	22	81	4600
9:50	26	60	5500	24	64	4300
10:10	24	61	2800	22	69	2000
10:30	28	57	11700	30	48	12800
10:50	24	55	3100	23	62	2400
11:10	19	71	2900	21	76	2700
11:30	23	78	3200	20	83	2900
11:50	22	79	3400	21	81	2935
12:10	20	72	3900	21	75	3500
12:30	22	78	3200	20	76	2700
12:50	22	71	3500	22	75	3300

Los resultados del análisis indican que el sistema presentó un error absoluto promedio de 1.62 °C en temperatura, 4.69 % en humedad relativa y 505.92 lux en intensidad lumínica. En cuanto al error porcentual promedio, se obtuvieron valores de 7.19 % para temperatura, 7.02 % para humedad relativa y 13.05% para intensidad lumínica.

Las diferencias observadas en la intensidad lumínica pueden atribuirse a variaciones repentinas en las condiciones de luz dentro del invernadero, como sombras proyectadas por árboles cercanos o pequeñas diferencias de tiempo entre las mediciones manuales y automáticas.

Para validar la relación entre las variables y comprobar si el sistema se comporta conforme a lo esperado desde el punto de vista físico (es decir, a mayor luminosidad se observa un incremento en la temperatura y una disminución en la humedad), se aplicó la correlación de Pearson, con el fin de

cuantificar el grado de asociación entre dos variables. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, que muestra la matriz de correlación correspondiente.

Tabla 2: Matriz de correlación

Matriz de correlación		Temp.	Humedad	Luminosidad	Temp.	Humedad	Luminosidad
		Validación			Sistema		
Temp.	Validación	1,000	-0,715	0,762	0,827	-0,782	0,694
Humedad		-0,715	1,000	-0,553	-0,782	0,925	-0,483
Luminosidad		0,762	-0,553	1,000	0,941	-0,788	0,989
Temp.	Sistema	0,827	-0,782	0,941	1,000	-0,928	0,913
Humedad		-0,782	0,925	-0,788	-0,928	1,000	-0,743
Luminosidad		0,694	-0,483	0,989	0,913	-0,743	1,000

Las correlaciones estimadas corroboran los patrones típicos en un invernadero: la temperatura mantiene una relación inversa con la humedad y directa con la luminosidad. Asimismo, la humedad tiende a disminuir a medida que la luminosidad se incrementa. Estos hallazgos respaldan la viabilidad del sistema de monitoreo y la confiabilidad de los sensores empleados.

V. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado demostró ser una solución funcional y de bajo costo para el monitoreo de variables ambientales en cultivos bajo invernadero; su implementación permitió la recolección continua de datos sobre temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica, variables fundamentales para el control agronómico de este tipo de cultivos; además, los sensores utilizados mostraron buen desempeño y las mediciones fueron validadas mediante comparaciones con instrumentos de referencia, confirmando su precisión.

Los datos recolectados fueron enviados exitosamente a una plataforma en la nube, lo que permite su visualización en tiempo real desde cualquier dispositivo con acceso a internet; esta funcionalidad contribuye a la toma de decisiones informadas por parte del agricultor y representa un paso hacia la transformación digital del agro colombiano.

En términos generales, el sistema mostró ser una herramienta útil para el monitoreo ambiental en cultivos bajo invernadero, con potencial para ser replicada o ampliada a otros contextos rurales; destacando su facilidad de implementación, su adaptabilidad y su pertinencia para pequeños y medianos

productores que busquen soluciones tecnológicas accesibles para mejorar sus prácticas productivas.

VI. LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Durante el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo se identificaron varias limitaciones técnicas que condicionaron el desempeño y la escalabilidad de la solución propuesta; una de las principales barreras encontradas fue la restricción impuesta por la red institucional, la cual bloqueaba el tráfico del protocolo MQTT, afectando directamente la comunicación entre los nodos de sensado y el gateway central.

Otra limitante importante corresponde al alcance de la red Wi-Fi utilizada para la transmisión de los datos, que aunque es una solución económica e integrada en los microcontroladores ESP32, posee un rango de cobertura reducido, lo cual dificulta su uso en cultivos de mayor extensión o en zonas rurales, donde no se dispone de infraestructura inalámbrica robusta; como alternativa, se podrían considerar tecnologías de comunicación de mayor alcance como LoRaWAN o módulos Xbee, que permiten establecer redes más extensas.

Aunque el sistema de monitoreo de variables funcionó de manera exitosa, es importante señalar que este resultado, por sí solo, no garantiza una amplia adopción de tecnologías en el sector agrícola colombiano; como lo señala Pérez et al. [17], existen factores sociales y políticos que juegan un papel determinante en la incorporación de nuevas tecnologías en el ámbito agrícola.

Desde la perspectiva del trabajo futuro, se abren varias líneas de mejora del sistema, una de ellas es la integración del sistema de monitoreo con un sistema de control automático del riego, cerrando el ciclo entre la medición de variables y la acción correspondiente; esta integración se podría reforzar mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial o aprendizaje automático, lo que permitiría analizar patrones históricos de datos y predecir condiciones óptimas de riego, buscando un sistema de riego inteligente, en línea con las tendencias actuales en agricultura de precisión, donde la convergencia entre IoT e inteligencia artificial está siendo ampliamente explorada para mejorar la toma de decisiones y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, como lo exponen Sharma y Shivandu [18] en su trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Católica de Oriente y a su Facultad de Ingenierías por su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] P. Mazur, D. Gozdowski, and A. Wnuk, "Relationships between Soil Electrical Conductivity and Sentinel-2-Derived NDVI with pH and Content of Selected Nutrients," *Agron.* 2022, Vol. 12, Page 354, vol. 12, no. 2, p. 354, Jan. 2022, doi: 10.3390/AGRONOMY12020354.
- [2] J. Paolo *et al.*, "Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual," *Lámpsakos*, ISSN-e 2145-4086, ISSN 2145-4086, N.º. 22 (Julio-Diciembre), 2019, págs. 86-105, no. 22, pp. 86–105, 2019, doi: 10.21501/21454086.3253.
- [3] P. Saha, V. Kumar, S. Kathuria, A. Gehlot, V. Pachouri, and A. S. Duggal, "Precision Agriculture Using Internet of Things and Wireless Sensor Networks," *2023 Int. Conf. Disruptive Technol. ICDT 2023*, pp. 519–522, 2023, doi: 10.1109/ICDT57929.2023.10150678.
- [4] A. L. Duguma and X. Bai, "Contribution of Internet of Things (IoT) in improving agricultural systems," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 2195–2208, Jan. 2024, doi: 10.1007/S13762-023-05162-7/TABLES/3.
- [5] G. E. Rambauth Ibarra, "Agricultura de precisión: la integración de las TIC en la producción agrícola," *Comput. Electron. Sci. Theory Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 34–38, Mar. 2022, doi: 10.17981/CESTA.03.01.2022.04.
- [6] A. O. Beltran, "Plataformas Tecnológicas en la Agricultura 4.0: una Mirada al Desarrollo en Colombia," *CESTA*, vol. 3, no. 1, pp. 9–18, Mar. 2022, doi: 10.17981/CESTA.03.01.2022.02.
- [7] J. S. Botero-Valencia, M. Mejia-Herrera, and J. M. Pearce, "Low cost climate station for smart agriculture applications with photovoltaic energy and wireless communication," *HardwareX*, vol. 11, p. e00296, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.OHX.2022.E00296.
- [8] J. C. Amaya Diaz *et al.*, "Monitoring system of environmental variables for a strawberry crop using IoT tools," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 170, pp. 1083–1089, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.03.067.
- [9] K. R. Gsangaya, S. S. H. Hajjaj, M. T. H. Sultan, and L. S. Hua, "Portable, wireless, and effective internet of things-based sensors for precision agriculture," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 9, pp. 3901–3916, Sep. 2020, doi: 10.1007/S13762-020-02737-6/METRICS.
- [10] N. Sadek, N. kamal, and D. Shehata, "Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 2, p. 102341, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.ASEJ.2023.102341.
- [11] N. Ahmad, A. Hussain, I. Ullah, and B. H. Zaidi, "IOT based wireless sensor network for precision agriculture," *iEECON 2019 - 7th Int. Electr. Eng. Congr. Proc.*, Mar. 2019, doi: 10.1109/IEECON45304.2019.8938854.
- [12] M. Bertolami, "¿Qué le puede aportar la tecnología a la industria agro?," 2022. <https://forbes.co/2022/12/15/red-forbes/que-le-puede-aportar-la-tecnologia-a-la-industria-agro> (accessed Sep. 22, 2025).
- [13] G. Singh and J. Singh, "Transformative Potential of IoT for Developing Smart Agriculture System: A Systematic Review," *4th Int. Conf. Commun. Comput. Ind. 6.0, C216 2023*, 2023, doi: 10.1109/C21659362.2023.10430789.
- [14] F. Bing, "The research of IOT of agriculture based on three layers architecture," *Proc. 2016 2nd Int. Conf. Cloud Comput. Internet Things, CCIOT 2016*, pp. 162–165, Mar. 2017, doi: 10.1109/CCIOT.2016.7868325.
- [15] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuvanshi, "Internet of Things for Agricultural Applications: The State of the Art," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 14, pp. 10973–10997, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3051418.
- [16] D. K. Singh and R. Sobti, "Wireless Communication Technologies for Internet of Things and Precision Agriculture: A Review," *Proc. IEEE Int. Conf. Signal Process. Control*, vol. 2021-October, pp. 765–769, 2021, doi: 10.1109/ISPPCC53510.2021.9609421.
- [17] D. J. Pérez-Ortega, F. A. Bolaños-Alomia, and A. M. da Silva, "Variables that influence the application of precision agriculture in Colombia: review of studies," *Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 23, no. 1, p. 2298, 2022, doi: 10.21930/RCTA.VOL23_NUM1_ART:2298.
- [18] K. Sharma and S. K. Shivandu, "Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture," *Sensors Int.*, vol. 5, p. 100292, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.SINTL.2024.100292.