ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 48 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Desarrollo de un prototipo IoT para la automatización del riego en invernaderos agrícolas sostenibles

Development of an IoT prototype for automated irrigation in sustainable

Sergio Andrés Hurtado Vargas[1]
Diego Alejandro Gutiérrez Naranjo[1]
Javier Eduardo Martínez Baquero[1]

[1] **Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Especialización en Instrumentación y Control Industrial, Villavicencio, Meta, Colombia.**

Recibido: 24 mayo 2026. Revisado: 26 junio 2026. Aceptado: 10 julio 2026. Publicado: 15 julio 2026.
Autor de correspondencia: Javier Eduardo Martínez Baquero

Cómo citar: S. A. Hurtado Vargas, D. A. Gutiérrez Naranjo, and J. E. Martínez Baquero, "Desarrollo de un prototipo IoT para la automatización del riego en invernaderos agrícolas sostenibles", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 48, jul. 2026, art. no. 4510, doi: 10.24054/rcta.v2i48.4510

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

La agricultura de precisión requiere soluciones tecnológicas que optimicen el uso del agua y mejoren el monitoreo de las variables ambientales en cultivos protegidos. Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación de un prototipo IoT para el monitoreo y control automático del riego en un invernadero destinado al cultivo de cilantro (Coriandrum sativum L.). La arquitectura propuesta integra un microcontrolador ESP32 como nodo central, sensores DHT22 y DHT11 para la medición de temperatura y humedad relativa, un controlador PID Autonics TK4S para el control térmico, un módulo RTC DS1302 para la programación horaria y un servidor web embebido que permite la supervisión y configuración del sistema mediante una red local inalámbrica, sin dependencia de servicios en la nube. La validación experimental se realizó durante 24 horas bajo condiciones controladas y representativas de operación, con adquisición de datos cada cinco minutos y almacenamiento horario de información. Los resultados evidenciaron un funcionamiento estable del sistema, con disponibilidad del 100%, respuesta de la electroválvula inferior a un segundo, ausencia de pérdidas de comunicación y ejecución correcta de todos los eventos programados. Las variables ambientales permanecieron dentro de rangos adecuados para el cultivo de cilantro, registrándose temperaturas entre 23,3 °C y 23,6 °C y humedades relativas entre 80% y 84%. Asimismo, la comparación con un esquema convencional mostró una reducción del 25,2% en el consumo de agua, una disminución del 37,5% en el número de eventos de riego y una reducción del 25% en el tiempo de bombeo. Los resultados demuestran la viabilidad técnica de la arquitectura IoT propuesta como una alternativa de bajo costo para mejorar la eficiencia hídrica y el monitoreo automatizado en sistemas de agricultura protegida.

Palabras clave: agricultura sostenible, automatización, invernaderos, internet de las cosas, prototipo.

Abstract:

Precision agriculture requires technological solutions that optimize water use and improve the monitoring of environmental variables in protected cropping systems. This study presents the design, implementation, and validation of an Internet of Things (IoT)-based prototype for automatic irrigation monitoring and control in a greenhouse dedicated to cilantro (Coriandrum sativum L.) cultivation. The proposed architecture integrates an ESP32 microcontroller as the central processing unit, DHT22 and DHT11 sensors for temperature and relative humidity measurement, an Autonics TK4S PID controller for thermal regulation, a DS1302 real-time clock (RTC) module for scheduling irrigation events, and an embedded web server that enables system monitoring and configuration through a local wireless network without relying on cloud-based services. Experimental validation was conducted over a continuous 24-hour period under both controlled and representative operating conditions, with environmental data acquired every five minutes and stored on an hourly basis. The results demonstrated stable system performance, achieving 100% availability, a solenoid valve response time of less than one second, no communication failures, and successful execution of all scheduled irrigation events. Environmental variables remained within suitable ranges for cilantro cultivation, with temperatures between 23.3 °C and 23.6 °C and relative humidity values ranging from 80% to 84%. Furthermore, comparison with a conventional irrigation strategy showed a 25.2% reduction in water consumption, a 37.5% decrease in the number of irrigation events, and a 25% reduction in pumping time. These findings demonstrate the technical feasibility of the proposed IoT architecture as a cost-effective solution for improving water-use efficiency and automated environmental monitoring in protected agriculture systems.

Keywords: automation, greenhouses, internet of things, prototype, sustainable agriculture.

INTRODUCCIÓN

La creciente escasez de agua, el incremento de la demanda de alimentos y los efectos del cambio climático han impulsado el desarrollo de sistemas inteligentes para optimizar el uso de los recursos hídricos en la agricultura[1-2]. Aunque el Internet de las Cosas (IoT) ha demostrado ser una tecnología prometedora para el monitoreo y automatización de cultivos, su adopción por pequeños y medianos productores continúa siendo limitada debido al costo de implementación, la dependencia de infraestructura de comunicaciones y la complejidad de muchas arquitecturas reportadas[3].

En la literatura reciente se han desarrollado múltiples arquitecturas IoT orientadas al riego inteligente. Algunos trabajos se enfocan principalmente en la adquisición y visualización remota de variables ambientales como humedad del suelo, temperatura e iluminación mediante redes inalámbricas y plataformas en la nube, permitiendo supervisión en tiempo real y análisis histórico de datos[4].

Por otra parte, el cilantro (Coriandrum sativum L.), que también recibe el nombre de coriandro, se caracteriza por ser una planta herbácea anual (lo que significa que completa su ciclo vital en un solo año), generando un alto interés proveniente del esquema de producción agrícola. Sin embargo, diversos estudios han corroborado como temperaturas elevadas provocan un acontecimiento que es muy común, llamado espigamiento o floración prematura que trae como consecuencia la reducción de su valor comercial junto con cambios en su sabor[5].

Otros estudios incorporan algoritmos de control automático para optimizar el suministro de agua e incluso integrar inteligencia artificial y energías renovables, logrando mejoras significativas en la eficiencia hídrica y energética[6-7].

Asimismo, se han reportado arquitecturas basadas en Raspberry Pi, ESP32, LoRa y LoRaWAN que facilitan la conectividad de sensores distribuidos y el monitoreo de invernaderos agrícolas.

Es significativa la importancia que tiene a nivel global encontrando prácticas como en Israel, España y Australia que son un ejemplo de ello. Aun así se requiere del apoyo coordinado de políticas públicas, en conjunto con una comunicación asertiva frente a riesgos y una colaboración internacional, partiendo de los países en desarrollo[8].

En el campo de la agricultura se pueden encontrar Traditional Irrigation Systems (TIS), conocidos como Sistemas Tradicionales de Riego, los cuales se componen de una estructura socio-técnico-ecológicas, y pertenecen a los sistemas hidro-sociales antiguos y complejos que son infraestructuras de gestión del agua, que se han mantenido a través de los siglos y a partir del estudio de distintos casos empíricos, se sostiene que los contextos culturales, sociales y económicos específicos influyen en los procesos de toma de decisiones relacionados con el acceso a los recursos[9-10].

A primera vista se puede concluir que la implementación de sistemas automatizados dependería únicamente del suministro de recursos para el sistema de riego, pero, en Colombia la realidad es muy distinta. Se hace énfasis en el campo de los pequeños agricultores que representan un 70,8% de la producción total agropecuaria lo cual es un gran número, sin embargo, sólo es posible para el 2,4% acceder a esta nueva tecnología que se denomina IoT, desde luego se han presentado alternativas teniendo en cuenta dichos factores, a través de plataformas de acceso libre tales como LoRa y LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) siendo el municipio de San Cristóbal protagonista[11].

Esta baja adopción de innovación también se muestra en la región Caribe colombiana debido a la contextualización agrícola del país evidenciando métodos clásicos de riego, no obstante se encuentra el 93% de la producción nacional de berenjena con lo cual se marca una limitada tecnificación[12].

En esa misma línea, un estudio desarrollado en Sesquilé, Cundinamarca, evaluó la estrategia de riego deficitario controlado (RDC) en cultivos de pera, demostrando que es posible reducir significativamente la aplicación de agua sin comprometer el rendimiento ni la calidad del fruto. Los resultados evidenciaron mecanismos de ajuste osmótico en las plantas, lo que les permitió enfrentar restricciones hídricas durante el crecimiento del fruto sin afectar la productividad[13].

Estas limitaciones representan un vacío tecnológico relevante para la agricultura de precisión, especialmente en contextos donde la disponibilidad de infraestructura digital es reducida y se requieren soluciones económicas, confiables y fácilmente escalables. En consecuencia, existe la necesidad de desarrollar arquitecturas IoT que integren adquisición de datos, control automático, almacenamiento histórico, gestión inteligente de alarmas y supervisión local sin depender de servicios externos, garantizando continuidad operativa y facilidad de implementación[14-15].

En este sentido, se demuestra que dadas las condiciones térmicas, especialmente por los factores del suelo y a secciones específicas de horarios como por ejemplo el de la tarde, conlleva a que su rol sea determinante para el desarrollo del cultivo, donde rangos próximos a los 28 °C y 32,5 °C aportan en el crecimiento apropiado[16].

A pesar de los avances reportados en sistemas IoT para agricultura de precisión, la mayoría de las investigaciones se orientan al monitoreo remoto de variables ambientales o a la automatización de funciones específicas, dependiendo con frecuencia de plataformas en la nube, infraestructura de comunicaciones permanente o arquitecturas de alto costo que limitan su adopción

por pequeños y medianos productores.

Asimismo, son escasos los trabajos que integran, en una única arquitectura, monitoreo en tiempo real, control automático del riego, almacenamiento local de datos, gestión de alarmas, trazabilidad de eventos y una interfaz web embebida que opere de forma autónoma en redes locales. En este contexto, el problema de investigación consiste en determinar cómo desarrollar una arquitectura IoT de bajo costo que permita optimizar el riego en invernaderos agrícolas mediante la integración confiable de sensores, actuadores, algoritmos de control y herramientas de supervisión, sin depender de servicios externos de conectividad[17].

Por tal razón, en ciudades con climas húmedos o cálidos de referencia Villavicencio (Colombia), donde se origina un gran reto debido a su elevación en la escala de celsius que condiciona al patrón en el comportamiento del cilantro. En consecuencia, este trabajo propone e implementa un prototipo funcional que busca cerrar dicho vacío tecnológico, proporcionando una solución escalable, autónoma y adaptable a las condiciones de pequeños productores, fortaleciendo la eficiencia en el uso del agua y facilitando la incorporación de tecnologías de agricultura de precisión en contextos con recursos limitados, en aras de superar las limitaciones identificadas en trabajos previos mediante una arquitectura autónoma, de bajo costo y fácilmente replicable, orientada a optimizar el uso del agua y facilitar la adopción de tecnologías de agricultura de precisión por pequeños y medianos productores.

METODOLOGÍA

Con el propósito de desarrollar el prototipo automatizado para el riego en invernaderos agrícolas se hace uso del tipo de metodología aplicada que permite combinar la observación y el análisis a través de diferentes fenómenos naturales dentro de dicha estructura, para así implementar un control de variables que permitan verificar el planteamiento de causa-efecto, por medio de una red compuesta de etapas donde se debe partir de una fuente de indagación profunda, para proceder con la determinación de criterios técnicos (diseño, ensamblaje y programación) y agrícolas, para generar como resultado el desarrollo de un sistema IoT.

A continuación se detallan las etapas desarrolladas.

Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica analizó artículos científicos recientes sobre agricultura de precisión, riego inteligente, Internet de las Cosas (IoT) y automatización de invernaderos, lo cula permitió identificar tecnologías, arquitecturas, sensores, protocolos y estrategias de control, además de establecer la brecha de investigación, el problema técnico y los criterios que orientaron el diseño del prototipo.

Parámetros técnicos y agrícolas

Los parámetros técnicos y agrícolas del proyecto se definieron a partir de los requerimientos del cultivo en invernadero y de las condiciones necesarias para garantizar un uso eficiente del recurso hídrico. Desde el punto de vista técnico, la arquitectura se fundamentó en una tarjeta ESP32 como unidad central de procesamiento, sensores DHT11 y DHT22 para el monitoreo de temperatura y humedad, un módulo RTC DS1302 para la programación horaria, un sistema de relés para el accionamiento de la electroválvula y una interfaz web embebida para supervisión y configuración local.

Adicionalmente, se implementaron mecanismos de almacenamiento persistente, registro histórico y gestión de alarmas. En el ámbito agrícola, se establecieron umbrales de temperatura, humedad y horarios de riego acordes con las necesidades del cultivo en invernadero, buscando mantener condiciones ambientales estables, optimizar el consumo de agua, favorecer el desarrollo fisiológico de las plantas y facilitar la validación experimental del prototipo en condiciones controladas.

Diseño y desarrollo del sistema IoT

A continuación, se presenta el diseño y planos de la estructura en tres dimensiones del sistema de riego automatizado hechos con la aplicación de SolidWorks. En la Fig. 1 se observa el diseño 3D del invernadero

En la Fig. 2 se encuentran las superficies del boceto propuesto, se añaden vista frontal, lateral y superior. El propósito de las mismas es permitir visualizar de manera explícita la geometría del prototipo, apoyando la comprensión de las dimensiones, espacios y ubicación de los componentes.

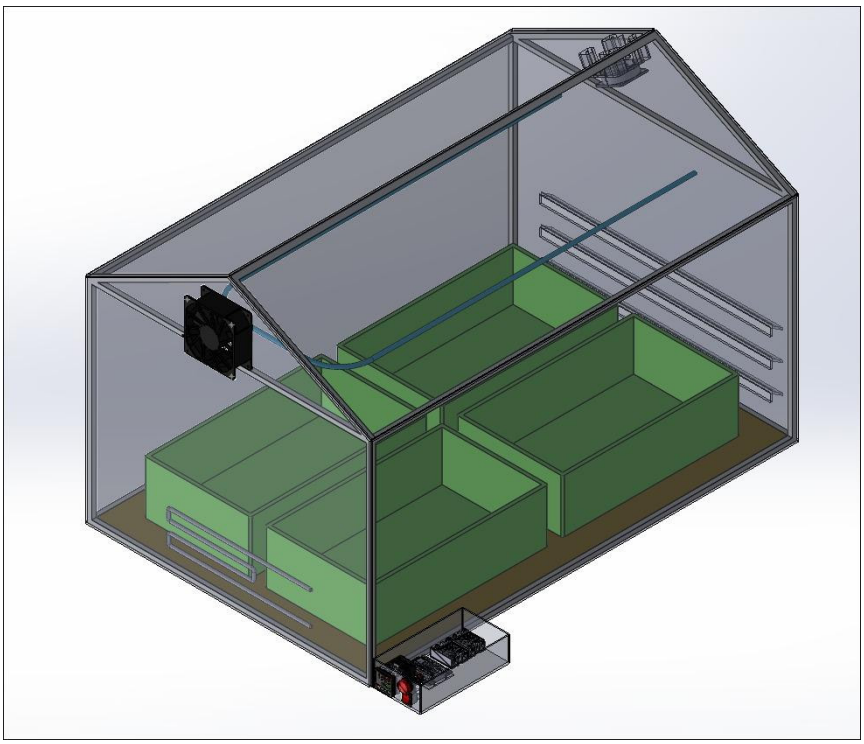
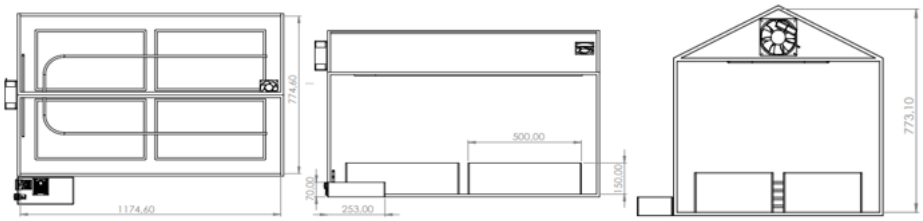


Fig. 1 Diseño 3D del Invernadero.



(a) Plano con vista superior del Invernadero. *(b) Plano con vista lateral del Invernadero.* *(c) Plano con vista frontal del Invernadero.*

Fig. 2. *Planos del invernadero.*

Ensambles y conexiones

Teniendo en cuenta la finalización del diseño, se procede a implementar el ensamblaje de la estructura, como se observa en la Fig. 3, junto con las conexiones de los sensores y actuadores tal como se muestra en la Fig. 4.

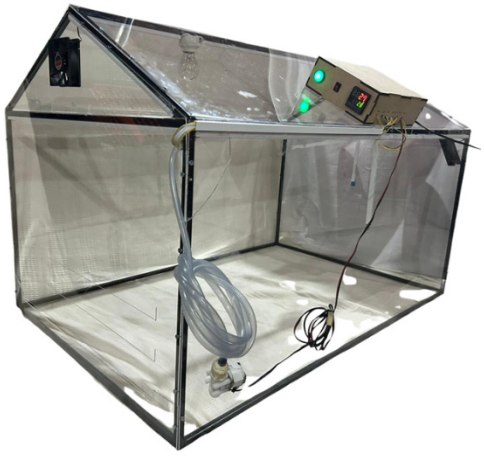


Fig. 3. *Estructura ensamblada del prototipo de Invernadero.*

El sistema de instrumentación está compuesto por un sensor DHT22 instalado en la zona principal del invernadero debido a su mayor precisión (±0.5 °C y ±2% HR) para el monitoreo continuo de las variables ambientales críticas, mientras que los sensores DHT11 fueron utilizados en módulos secundarios destinados al seguimiento de condiciones locales del cultivo. La referencia temporal es suministrada mediante un módulo RTC DS1302 con batería de respaldo, garantizando la continuidad de la programación horaria aun cuando el sistema es desconectado de la alimentación eléctrica.

Interfaz y comunicaciones

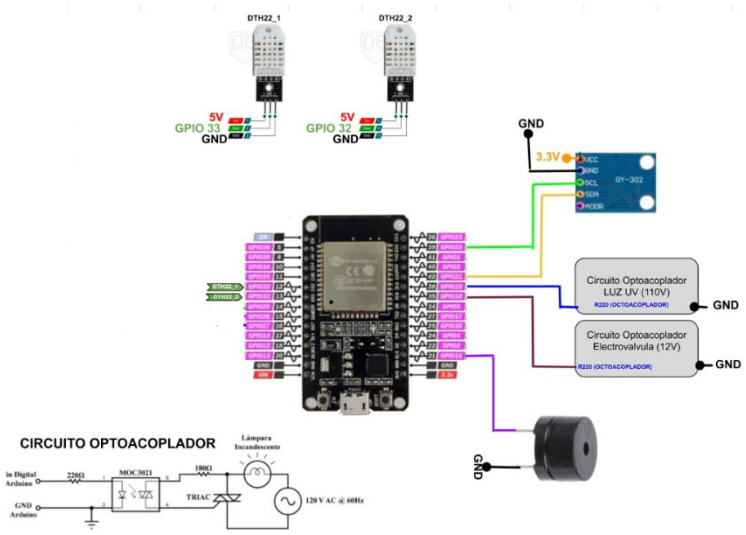


Fig. 4 Circuito esquemático del sistema de riego automático (Sensores y Actuadores).

El prototipo de monitoreo y sistema de riego del invernadero se implementó por medio del uso de una tarjeta ESP32, la cual tiene como objetivo ser el centro de procesamiento y envío de datos. Por lo tanto, el progreso del sistema se intervino desde el ámbito de Arduino IDE, utilizando variedad de librerías que manejan una comunicación con sensores, módulos de transmisión, y recepción de datos.

Dado los pines asignados se añadieron sensores de temperatura, humedad e intensidad de luz los cuales permiten obtener información clave para la sentencia dentro del sistema con los siguientes modelos respectivos: un sensor DHT11 y otro DHT22, para la supervisión de las variables ambientales.

Para manipular el tiempo y programar eventos, se empleó un adaptador de reloj en tiempo real (RTC) que surge del integrado DS1302. Dicho dispositivo funciona con el propósito de llevar un base de datos de la fecha y hora, lo cual es prioridad para establecer tiempos de riego e iluminación dentro del mecanismo.

Asimismo, se incorpora como actuador el relé, para poder activar el riego con la electroválvula. Su comportamiento depende de dos puntos importantes, el primero su factor ambiental y el segundo la lógica de programación dada (condiciones). En la Fig. 5 se muestra el diagrama de flujo del programa en Arduino IDE

Para la conexión IoT, el ESP32 se modificó a través del punto de acceso (Access Point) lo cual genera que el mismo establezca una red local independiente, creando una ventaja para el usuario al momento de conectarse directamente desde cualquier dispositivo sin tener que permanecer conectado a una red de internet.

De la misma manera, la visualización y control de variables quedó adherida al servidor web el cual se crea por medio de la librería WebServer posibilitando la accesibilidad desde el navegador, para realizar el proceso de monitoreo en tiempo real. Cabe destacar que los protocolos de comunicación entre la interfaz web y el sistema se basan específicamente en HTTP (Hypertext Transfer Protocol), además, los datos se establecieron como tipo JSON (JavaScript Object Notation).

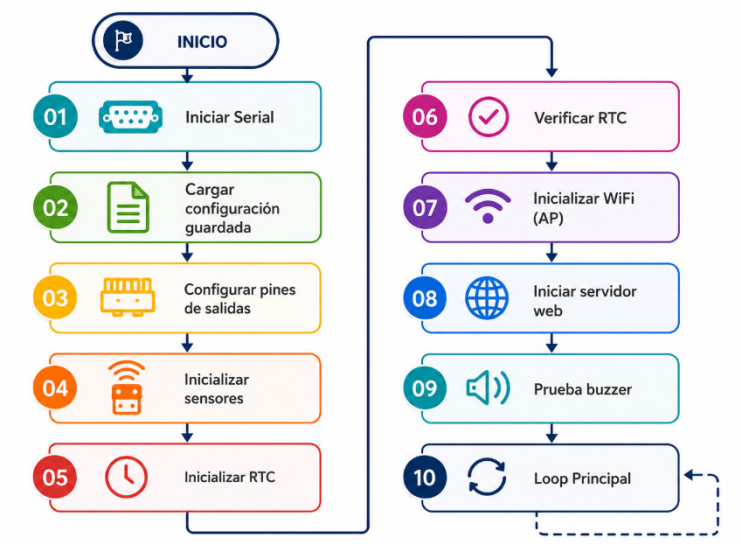


Fig. 5. *Diagrama de flujo del programa en Arduino IDE.*

A propósito se busca darle una utilidad a los datos recolectados a través de un sistema de almacenamiento por lo que se emplea la librería Preferences, para poder hacer uso de los umbrales de temperatura, humedad, y horarios, impidiendo pérdidas al reanudar cada proceso.

Para llevar a cabo un registro de eventos de riego se define una estructura llamada WaterEvent, que lleva el conteo de cada riego realizado, permitiendo salvar la fecha, la hora exacta de inicio y el intervalo del riego en milisegundos. Su importancia resalta en la trazabilidad que se puede establecer en proyectos IoT agrícolas. Dentro de lo establecido en la plataforma web resalta el sistema de alarmas debido a la función AlarmState evaluateAlarms(), su tarea básicamente consiste en analizar todos los sensores determinando el estado del sistema donde se envían mensajes de alerta indicando su ejecución normal, o si se encaminó a una fase de alerta, crítico o falla del sensor.

Por último, el control automático del riego depende de las condiciones ambientales definidas como umbrales, el usuario podrá escoger de acuerdo a la necesidad que surjan. En la Fig. 6 se muestra el diagrama de flujo del sistema de riego.

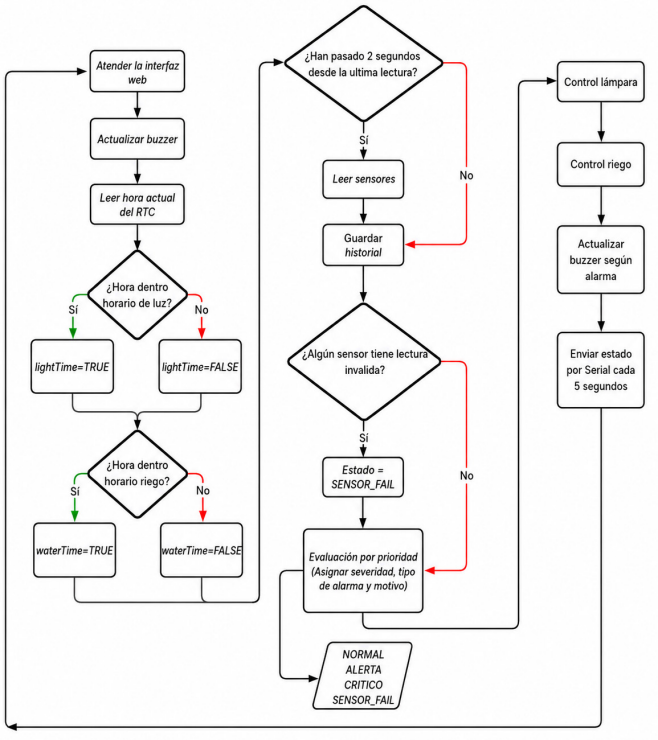


Fig. 6. *Diagrama de flujo sistema de riego.*

Para el diagrama de comunicación del prototipo de invernadero, mostrado en la Fig. 7, se definieron las diferentes funciones, el ESP32 tiene como rol ser el nodo central, a través de la adquisición de datos de los sensores de humedad y temperatura para luego gestionar la válvula solenoide que sería el actuador del sistema. Por medio de una vía de acceso al WiFi, los clientes tienen la posibilidad de vincularse al servidor web embebido para monitorear en vivo y realizar ajustes del proyecto con la ayuda de la interfaz web[18].

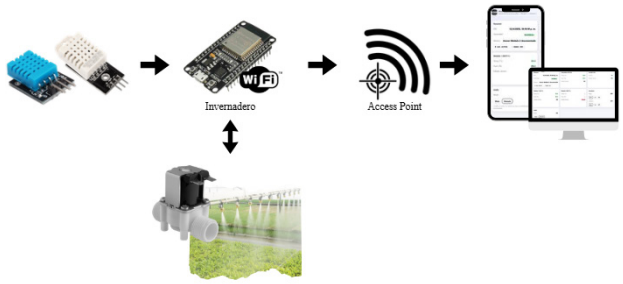


Fig. 7. *Diagrama de comunicación de datos e interfaz IoT.*

Control PID

El control PID se caracteriza por ser usado de manera amplia en la industria puesto que su arquitectura e implementación presentan una gran versatilidad y manejo. Asimismo, es muy común observar en el 95% de los lazos de control sistemas de este tipo, ya que su rendimiento depende netamente del acoplamiento de sus tres parámetros, osea, las ganancias proporcional, integral y derivativa.

La forma de configuración de los criterios en un controlador PID puede ser de dos tipos, la primera planta su base en los modelos esto quiere decir que se enfoca en identificar la estructura y umbrales de la planta controlada para optimizarla pero puede conllevar a gastar mucho tiempo así como no obtener los resultados esperados y la segunda busca su enfoque hacia los datos necesitando únicamente la información de entrada y salida del sistema para dictaminar las limitantes del controlador sin necesitar expresamente un modelo[19]. La ecuación (1) corresponde al controlador PID.

$$u(t) = Kpe(t) + \frac{Kp}{Ti}\int e(t)dt + KpTd\frac{d}{dt}e(t) \qquad (1)$$

Configuración de controlador de temperatura TK4S

Para efectuar un control de temperatura dentro del invernadero, se emplea el controlador digital Autonics TK4S PID de alto rendimiento usando una termocupla tipo K para registrar el dato, pero para hacer la lectura se debe configurar primero teniendo en cuenta el manual donde se encuentra las conexiones de pines a las cuales debe estar la termocupla, en este caso se usa el once y doce como se muestra en la Fig. 8 [20].

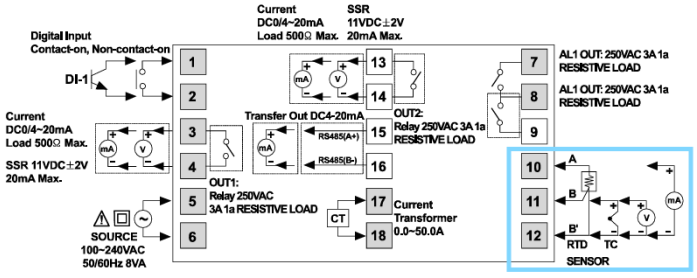


Fig. 8. *Manual TK4S para las conexiones eléctricas de la TC al controlador.*

Ahora, sigue la configuración del sistema a través de los parámetros, específicamente el número tres, con el fin de adecuar el equipo para la operación de la termocupla, a continuación se presenta la Tabla 1 con las restricciones:

Tabla 1: Parámetros del controlador digital Autonics TK4S

Parámetro 3	
Indicador	Valor configurado
Tipo de entrada	K
Unidad	°C
Offset	0 °C
Control Salida	H - C
Tipo Control	P.P

Parámetro 3	
Salida 1	SSR (Heat)
Salida 2	SSR (Cooling)
Tiempo Control Calentar	10.0 s
Tiempo Control Refrigeración	10.0 s

Después de establecerse los umbrales en el controlador, se procede a realizar el Auto-Tuning del dispositivo Autonics TK4S (haciendo uso del parámetro dos) se posiciona el punto de ajuste (conocido también como setpoint) en veintinueve y se hace el registro correspondiente de los parámetros obtenidos en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del controlador PID a través del método de Auto-Tuning

Parámetro 2		
Controlador	Valor Calentamiento	Valor Refrigeración
Proporcional	0,9	0,9
Integral	117	117
Derivativo	24	24

Una vez establecidos los parámetros del controlador en la sección anterior, en la Fig. 9 se presenta la respuesta escalón del sistema de control PID.

Validación

La validación del prototipo se desarrolló en dos etapas complementarias. En la primera, se realizaron pruebas bajo condiciones controladas dentro del invernadero experimental, donde fue posible modificar las variables ambientales para verificar el funcionamiento individual de los sensores, actuadores, algoritmos de control y plataforma de supervisión.

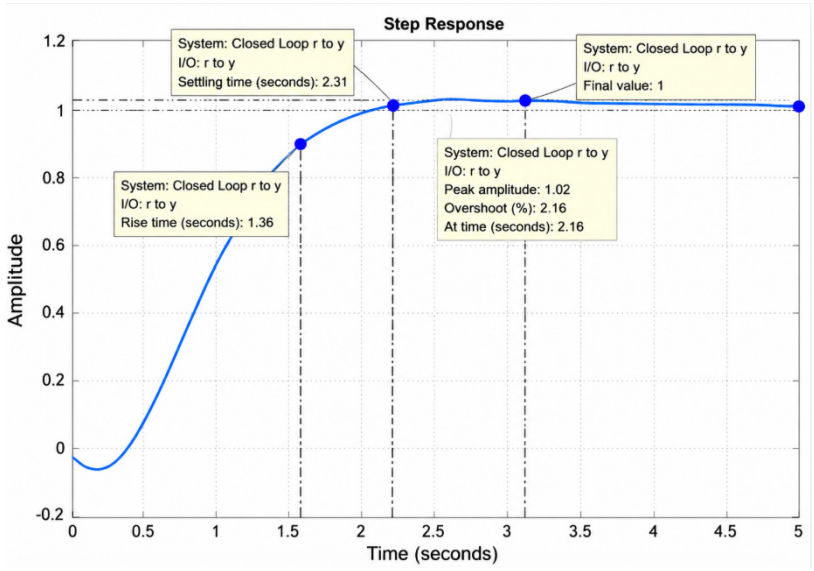


Fig. 9. *Respuesta escalón del controlador PID.*

Posteriormente, el sistema fue evaluado bajo condiciones representativas de operación, manteniendo el prototipo en funcionamiento continuo durante 24 horas, con adquisición de datos ambientales cada cinco minutos y almacenamiento de registros históricos cada hora. Este procedimiento permitió analizar la estabilidad de las mediciones, la disponibilidad del servidor web embebido, la confiabilidad de la comunicación inalámbrica y la respuesta automática del sistema durante un ciclo completo de operación sin intervención del usuario.

Las condiciones controladas consistieron en la simulación de diferentes escenarios de operación, incluyendo cambios en la temperatura, variaciones de humedad relativa y desconexión intencional de sensores para verificar el comportamiento del algoritmo de control y del sistema de alarmas. En contraste, las condiciones representativas de operación correspondieron al funcionamiento normal del prototipo, donde las decisiones de riego fueron ejecutadas automáticamente a partir de los umbrales configurados por el usuario y la programación horaria almacenada en el sistema.

En la Fig. 10 se presenta la ejecución del sistema de monitoreo de datos, en el cual se encuentra que la perspectiva del usuario se divide en las siguientes etapas.

La sección general consiste en la visualización del estado global del sistema dentro de la interfaz principal, se añade un resumen en vivo con los datos que contienen información pertinente a los sensores y el sistema de control. El reloj se sincroniza en tiempo real (RTC), respaldando el historial de datos. La interfaz concede la vista al mismo tiempo de lecturas de temperatura y humedad para diferentes zonas: sección principal del invernadero justificada con el sensor DHT22 y de igual manera los

dos módulos restantes de referencia DHT11.

El proceso de obtención sucede de manera periódica dependiendo del intervalo de tiempo definido, para posteriormente procesar y plasmar datos que se pueden apreciar incluso con precisión decimal y en adición al monitoreo de las variables hay una guía que entrega como salidas dos posibles estados de los sensores (OK/FALLO), en caso tal de que se pierda la comunicación siendo esta una versión de la industria donde se pueden detectar fallas para no vincular la operación integral del sistema. La estructura evalúa de manera frecuente los umbrales definidos para accionar su actuador que en este caso es la lámpara, aplicando situaciones de control.

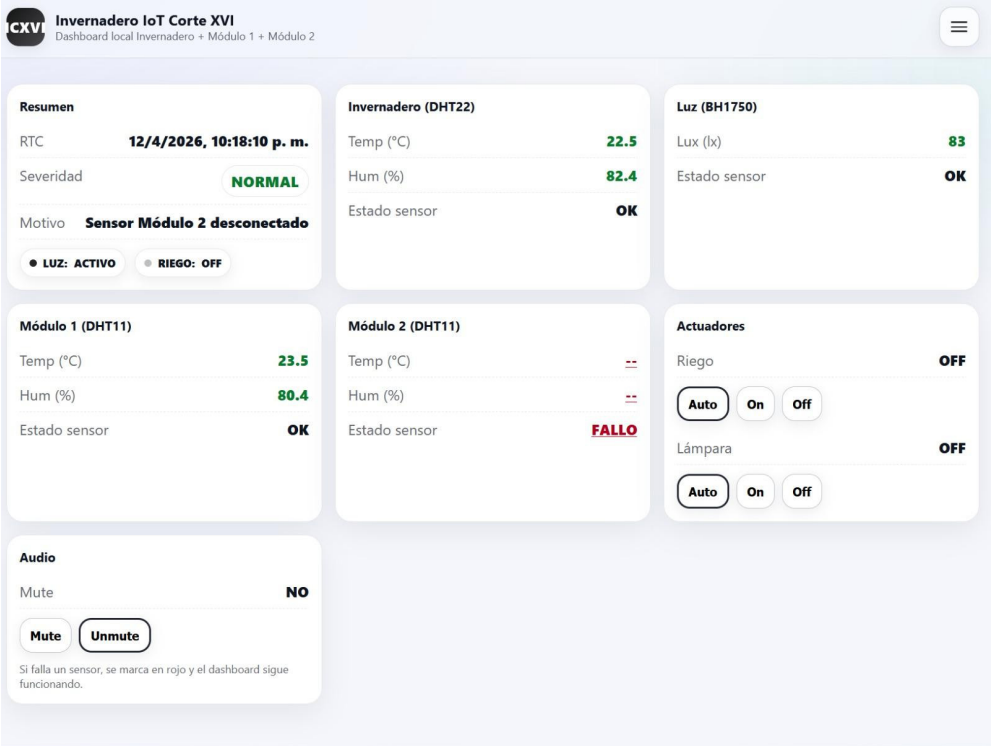


Fig. 10. *Interfaz general del programa IoT para el control del sistema de riego.*

RESULTADOS

En el control de los actuadores, el sistema integra una pieza de control tanto manual como automática para los actuadores; a través de la plataforma digital donde el usuario tiene la posibilidad de elegir entre las opciones de “Auto”, “On” y “Off” destaca la funcionalidad de las mismas, por ejemplo, en modo automático, las activaciones se basan en el entorno y horarios determinados, mientras que en el modo manual hay un control directo por parte del cliente.

Se integra una emisión de alerta controlada a través de un módulo buzzer, que tiene como condición el nivel de severidad que se detecte en el sistema, asimismo la interfaz maneja la opción de poder activar o desactivar la señal, brindando una mayor flexibilidad en el manejo que se le da en diferentes entornos, así como sus restricciones generan que las alarmas estén condicionadas a la situación actual del sistema y los ajustes de tiempo definidos.

Asimismo, se añade una señal de alarma la cual a través de una categorización de estado emitirá alertas dependiendo de su severidad y en relación a los umbrales establecidos, para ello se utilizó una función que evalúa las alarmas favoreciendo la interpretación de la operación del sistema. Se recalca el hecho de que el mismo sistema refleja la razón de la condición actual en la que se pueda encontrar, como se observa en el caso del Módulo 2 que tiene una desconexión del sensor, como se observa en la Fig. 11.

Como ítem de referencia, se puede visualizar que el sistema del invernadero muestra una variabilidad robusta en la toma, análisis y muestreo de información en tiempo real, la añadidura de los sensores como de actuadores y en conjunto con el servidor web centrado representa la viabilidad de ser pionero en propuestas IoT locales sin la necesidad de una conexión a la nube.

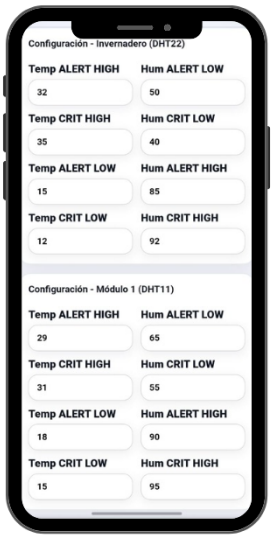


Fig. 11. *Interfaz de configuración de umbrales para el control del sistema de riego.*

La Fig. 12 presenta los esquemas relacionados al cambio en las variables de temperatura, humedad y nivel de iluminación fichadas en un lapso de tiempo de veinticuatro horas con una frecuencia de visualización de un dato por hora, de acuerdo a la estructura implementada en el diseño. Esta maniobra enfocada en el almacenamiento tiene como objetivo analizar tendencias sin llenar la memoria del microcontrolador, como ya se preestablecido en la programación a través de su registro histórico.

En la gráfica de temperatura, se aprecia una notoria diferencia entre las dos marcas de medición: el invernadero (GH) y el Módulo 1 (M1). El sensor principal (DHT22) muestra valores con una diferencia de elevación y estables, con alteraciones poco significativas dentro del rango de 23.3 °C a 23.6 °C, siendo coherente con su gran precisión. Mientras que el módulo DHT11 su diferencia es más notoria, lo cual puede estar asociado a la ubicación dada dentro del invernadero. La baja variación de los datos representa que el sistema sostiene una condición térmica parcialmente estable, por lo tanto es un comportamiento proyectado gracias a la lógica de control implementada.

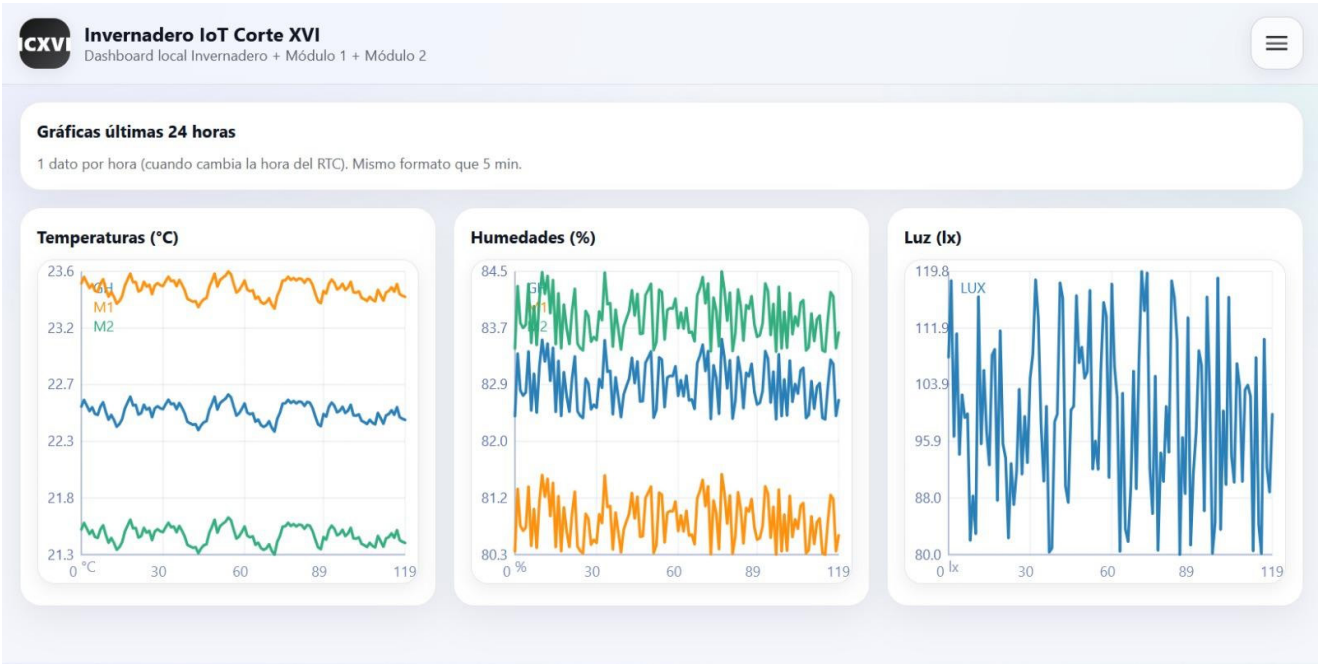


Fig. 12. *Variación de Variables Ambientales.*

Ahora, con respecto a la humedad, se divide en dos niveles identificados que claramente se diferencian en lo siguiente: los valores del sensor DHT22 oscilan de manera cercana al 84%, no obstante los del Módulo 1 se acercan al 80-83%. Claramente esta categorización puede interpretarse en que existe una tendencia a haber humedad dentro del sistema, debido al esparcimiento del riego y la funcionalidad de los ventiladores. Las oscilaciones presentadas tienen una baja amplitud, con lo cual se puede inferir que las alteraciones suceden de una forma progresiva acorde a la lógica de control programada.

Finalmente, con los resultados obtenidos se evidencia que el modelo ensamblado realiza correctamente la obtención de datos representando de forma clara las variables críticas del invernadero. Se realiza la validación de la estabilidad presentada en los hallazgos de temperatura y humedad a través de la lectura de sensores (readSensors()), el almacenamiento histórico (pushHistory5m() y maybeStoreHourSample()), y en suma el acoplamiento del sistema de control.

La diferenciación entre dispositivos tales como los sensores de temperatura evidencian las posibles limitantes o restricciones técnicas que se pueden presentar, en este caso el sensor DHT11 frente al DHT22 donde la precisión y confiabilidad suelen jugar en contra. Como resultado, estos datos evalúan la estructura implementada y comprueban su aplicabilidad en sistemas IoT con enfoque a la agricultura de precisión.

Los resultados obtenidos evidencian que la arquitectura desarrollada mantiene un funcionamiento estable durante todo el ciclo experimental, permitiendo reducir activaciones innecesarias del sistema de riego, mejorar la utilización del agua y garantizar la continuidad de la supervisión local mediante la interfaz web embebida. En la Tabla 3 se observan los indicadores de desempeño del sistema IoT.

Tabla 3: Indicadores de desempeño del sistema IoT

Indicador	Valor obtenido
Duración de la validación	24 h
Intervalo de adquisición	5 min
Registros almacenados	288
Disponibilidad del sistema	100%
Eventos de riego ejecutados correctamente	100%
Tiempo promedio de respuesta de la electroválvula	< 1 s
Error de temperatura (DHT22)	±0.5 °C
Error de humedad	±2 % HR
Pérdida de comunicación	0 eventos
Alarmas correctamente detectadas	100%

En la Tabla 4 se presenta un comparativo del consumo de agua.

Tabla 4: Comparación del consumo de agua

Variable	Riego convencional	Sistema IoT	Indicador
Agua utilizada (L/día)	42.5	31.8	↓ 25.2%
Ahorro de agua (%)	—	25.2	Respecto al convencional
Número de eventos de riego	8	5	↓ 37.5%
Tiempo total de bombeo (min/día)	72	54	↓ 25.0%

El ahorro de agua se calcula mediante la ecuación (2).

$$\text{Ahorro agua (\%)} = \frac{Vconv - VIoT}{Vconv}\ x\ 100\% \quad (2)$$

La principal contribución científica consiste en una arquitectura IoT integrada basada en ESP32 que combina monitoreo en tiempo real, riego automático, almacenamiento histórico, gestión de alarmas y servidor web embebido, sin depender de la nube. Su diseño escalable, confiable y de bajo costo fortalece la agricultura de precisión para pequeños productores.

La utilización de un servidor web embebido, almacenamiento local, red inalámbrica propia y componentes electrónicos comerciales elimina la dependencia de plataformas externas, reduce costos de operación y facilita la replicabilidad del sistema en diferentes escenarios de agricultura protegida.

CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un prototipo IoT para el monitoreo y control automático del riego en un invernadero, integrando sensores ambientales, un microcontrolador ESP32, un controlador PID para regulación de temperatura, almacenamiento local de datos y un servidor web embebido para supervisión y configuración remota. Las pruebas experimentales realizadas durante un ciclo continuo de 24 horas evidenciaron el funcionamiento estable de la arquitectura propuesta, con una disponibilidad del sistema del 100%, ausencia de pérdidas de comunicación y correcta ejecución de los eventos programados.

Los resultados experimentales demostraron que el sistema mantuvo condiciones ambientales estables durante el periodo de evaluación, registrando temperaturas entre 23,3 °C y 23,6 °C y humedades relativas entre 80% y 84%, valores compatibles con los rangos recomendados para el desarrollo del cultivo de cilantro bajo condiciones de agricultura protegida. Asimismo, el uso del sensor DHT22 permitió obtener mediciones más estables que las proporcionadas por los sensores DHT11, confirmando la influencia de la precisión instrumental en el desempeño del sistema de monitoreo.

La comparación con un esquema convencional de riego evidenció una disminución del volumen de agua suministrado, una reducción del número de eventos de riego y un menor tiempo acumulado de operación del sistema de bombeo, resultados que respaldan el potencial de la arquitectura IoT para optimizar la gestión del recurso hídrico en invernaderos de pequeña escala. Sin embargo, estos resultados corresponden exclusivamente a las condiciones experimentales evaluadas y no permiten

generalizar el desempeño del sistema a otros cultivos, escalas de producción o condiciones climáticas sin realizar procesos adicionales de validación.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran la duración de la validación experimental, restringida a un periodo de 24 horas, la evaluación sobre un único cultivo y la ausencia de pruebas prolongadas bajo diferentes condiciones estacionales y operativas. En consecuencia, el alcance de la solución propuesta se limita a demostrar la viabilidad técnica y funcional de una arquitectura IoT de bajo costo para el monitoreo y control automatizado del riego. Como trabajo futuro se recomienda desarrollar campañas experimentales de mayor duración, incorporar sensores de humedad del suelo y caudal para cuantificar directamente la eficiencia hídrica, así como validar el sistema en invernaderos de mayor escala y con diferentes especies agrícolas.

REFERENCIAS

[1] G. Pizzileo, L. Colizzi, E. Guerriero, T. Adamo, and M. V. Chiriacò, "Resource use efficiency and environmental sustainability in greenhouse agriculture through IoT-based irrigation and fertilization management," *Smart Agric. Technol.*, vol. 12, p. 101180, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101180.

[2] J. I. Saez Rojas, J. M. Pantoja, M. Matamala, I. C. Briceño, J. P. Vásconez, and A. R. Romero-Conrado, "An IoT-Based Prototype for Optimizing Agricultural Irrigation: A Case Study in the Biobío Region of Chile," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 238, pp. 1009–1014, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.127.

[3] D. A. Riaño-Herrera, D. A. Varela-Martínez, J. G. Chenet, D. A. García-García, S. D. Díaz-Verus, and L. Rodríguez-Urrego, "Driving sustainable urban development: Exploring the role of small-scale organic urban agriculture in Bogotá, Colombia: A case study," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 99, p. 104919, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104919.

[4] Q. Mamun, A. Zaman, R. H. L. Ip, and K. M. S. Haque, "A bibliographic study of integrating IoT and geospatial modelling for sustainable smart agriculture in developed countries: Focus on Australia," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 241, p. 111289, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111289.

[5] B. Meyering, A. Hoeffner, and U. Albrecht, "Reducing Preharvest Bolting in Open-field-grown Cilantro (Coriandrum sativum L. cv. Santo) through Use of Growth Regulators," *HortScience*, vol. 55, no. 1, pp. 63–70, 2019, doi: 10.21273/HORTSCI14614-19.

[6] S. Banluesapy, M. Ketcham, and M. Rattanasiriwongwut, "AI-Augmented Smart Irrigation System Using IoT and Solar Power for Sustainable Water and Energy Management," *Energy Eng.*, vol. 122, no. 10, pp. 4261–4296, 2025, doi: https://doi.org/10.32604/ee.2025.068422

[7] E. M. Correa-Álvarez, "Characterization of eggplant producers in the Caribbean region of Colombia: socio-economic aspects and local production technology", *Agron. Colomb.*, vol. 38, no. 1, pp. 120–132, Jan. 2020. https://doi.org/doi:10.15446/agron.colomb.v38n1.80706.

[8] O. V. Obayomi, R. Attah, S. M. S. Sayem, L. S. Mustapha, S. O. Kolade, and K. S. Obayomi, "Sustainable agriculture in the face of water scarcity: Opportunities, challenges, and global perspectives," *Next Res.*, vol. 5, p. 101293, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101293

[9] J. Höhl, J. Dame, and A. Videla-Oyarzo, "Exploring water (in)securities in a water-abundant setting: hydrosocial dynamics and local strategies in Central-South Chile," *Geoforum*, vol. 166, p. 104423, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2025.104423.

[10] C. da-Silva-Branco, A. G. de Brito, and P. C. Seixas, "A comprehensive review of traditional irrigation systems: Sustainability and future prospects," *Agric. Syst.*, vol. 231, p. 104481, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104481.

[11] A. C. Moreno-Hernández, J. E. Vélez-Sánchez, and D. S. Intrigliolo, "Effect of deficit irrigation on yield and quality of pear (Pyrus communis cv. Triumph of Vienna)", *Agron. Colomb.*, vol. 35, no. 3, pp. 350–356, Sep. 2017. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n3.64313

[12] S. Gupta et al., "Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency," *Smart Agric. Technol.*, vol. 12, p. 101081, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101081.

[13] P. Pereira, M. Inacio, D. Barcelo, and W. Zhao, "Impacts of agriculture intensification on biodiversity loss, climate change and ecosystem services," *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.*, vol. 46, p. 100637, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100637.

[14] V. S. J. Pitoro, C. A. de Amorim, J. R. Franco, and R. M. Sánchez-Román, "Application of low-cost soil moisture sensors for irrigation management in Brassica oleracea var. acephala cultivation," *Smart Agric. Technol.*, vol. 12, p. 101596, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101596.

[15] P. Arregoces-Guerra, J. F. Restrepo-Arias, M. Usme Martinez, J. P. Montoya-Yepes, and J. W. Branch-Bedoya, "Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0," *Rev. Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 24, no. 2, 2023, doi: 10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853.

[16] C. Sarada, Giridhar Kalidasu, T. Yellaman Da Reddy, And P. Venkata Reddy, "Weather modification for off-season production of coriander (Coriandrum sativum L.) for leaf", *J. Agrometeorol.*, vol. 13, no. 1, pp. 54–57, Jun. 2011. doi: https://doi.org/

[17] D. M. Matilla, Á. L. Murciego, D. M. J. Bravo, A. S. Mendes, and V. R. Q. Leithardt, "Low cost center pivot irrigation monitoring systems based on IoT and LoRaWAN technologies," in 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), 2020, pp. 262–267. doi: 10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277548

[18] S. Li, "Application of the Internet of Things Technology in Precision Agriculture IRrigation Systems," in 2012 International Conference

on Computer Science and Service System, 2012, pp. 1009–1013. doi: 10.1109/CSSS.2012.256.

[19] N. Liu et al., "Data-driven anti-windup adaptive PID control without persistent excitation," *Control Eng. Pract.*, vol. 173, p. 106974, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2026.106974.

[20] M. Fakhruddin, Y. Yuniarto, P. Ari Bawono, W. Heru, A. Eko, and T. Dista Yoel, "Realization of industrial based temperature heating control module using TK4S-T4RN," *Mater. Today Proc.*, vol. 63, pp. S424–S433, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.088.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Los Llanos y a la Especialización en Instrumentación y Control Industrial por su apoyo en la realización de este proyecto.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Sergio Andrés Hurtado Vargas, Diego Alejandro Gutiérrez Naranjo, Javier Eduardo Martínez Baquero.

Redacción - revisión y edición: Sergio Andrés Hurtado Vargas, Diego Alejandro Gutiérrez Naranjo, Javier Eduardo Martínez Baquero.