

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISION DE CARRERAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Implementación de un sistema domótico en invernadero para el control de riego
y seguimiento fenológico

Por:

Jose Enrique Fernández Zacarias

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Torreón, Coahuila, México
Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISION DE CARRERAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Implementación de un sistema domótico en invernadero para el control de riego y
seguimiento fenológico

Por:

Jose Enrique Fernández Zacarías

TESIS

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por:


Dr. Rubén López Salazar
presidente


Dr. Jorge Quiroz Mercado
Vocal


Dr. José Rafael Paredes Jacome
Vocal


Ing. Orlando Tomas Cruz
Vocal Suplente externo


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISION DE CARRERAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Implementación de un sistema domótico en invernadero para el control de riego y
seguimiento fenológico

Por:

Jose Enrique Fernández Zacarias

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por Comité de Asesoría:



Dr. Rubén López Salazar
Asesor Principal



Dr. Jose Rafael Paredes Jacome
Coasesor



Dr. Jorge Quiroz Mercado
Coasesor



Ing. Orlando Tomas Cruz
Coasesor externo



M.C Rafael Avila Cisneros
Coordinador de la División Regional de Agronomía



Torreón, Coahuila, México
Junio 2025

Dedicatorias

A lo largo de esta etapa, descubrí que los logros no se alcanzan en solitario, sino que se construyen con el amor, el apoyo y la presencia constante de quienes creemos inquebrantables en nuestra vida. Por eso, este trabajo lo dedico con el corazón en la mano a quienes han sido mi cimiento, mi inspiración y mi impulso para seguir adelante.

A mis padres, por ser el motor de mi existencia. Su ejemplo de lucha diaria, su sacrificio silencioso y su fe inquebrantable en mí me enseñaron a no rendirme, a mantenerme firme en mis sueños y a recordar siempre de dónde vengo. Gracias por enseñarme con hechos que el esfuerzo y la humildad son la base de todo verdadero logro.

A mis hermanos, con quienes comparto no solo la sangre, sino también los momentos difíciles, las risas inesperadas y los silencios que dicen más que mil palabras. Gracias por estar ahí, por extenderme la mano cuando más lo necesité, y por demostrarme que la familia siempre es un refugio en medio de cualquier tormenta.

A mi pareja, Yolanda, por caminar conmigo en esta travesía. Tu compañía fue mi paz en medio del caos, tu voz mi guía en las dudas, y tu amor, la fuerza que muchas veces me sostuvo cuando flaqueé. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía.

Y a mis abuelos, por enseñarme con su vida que el campo no es solo tierra: es herencia, es historia, es dignidad. En sus palabras, en sus manos cansadas y en sus enseñanzas llenas de sabiduría, encontré la razón más profunda para amar lo que hoy soy y lo que elegí ser.

Este trabajo es para ustedes. Porque sin ustedes, este sueño no tendría sentido.

Agradecimientos

Este trabajo no solo representa la culminación de una etapa académica, sino también el esfuerzo conjunto de muchas personas que marcaron profundamente mi vida, mi formación y mi manera de ver el mundo. A cada uno de ellos, les dedico estas palabras con el corazón lleno de gratitud.

A mis padres, que con su ejemplo me enseñaron a ser perseverante, a luchar incansablemente por mis sueños, y a comprender que un profesionista no debe quedarse quieto, sino avanzar, superarse y buscar siempre aportar algo valioso al mundo. Su apoyo, amor y consejos han sido la brújula que me ha guiado durante toda mi vida.

A mi novia, Yolanda Coyac, quien estuvo a mi lado en cada paso de esta carrera. Gracias por ayudarme, por tu comprensión en los momentos difíciles y por demostrarme, con hechos, que siempre estarás ahí para mí. Tu presencia ha sido una luz constante en este camino.

A mis abuelitos, que, con sus historias, enseñanzas y experiencias del campo, me mostraron desde pequeño la esencia del trabajo agrícola, el amor a la tierra y la importancia del esfuerzo honesto. Sus palabras sembraron en mí una profunda admiración por el campo, que hoy se refleja en mi formación profesional.

A mis abuelitas, cuyos recuerdos y amor siguen vivos en mi corazón. Aunque ya no están físicamente conmigo, su influencia y cariño me han acompañado siempre. Este logro también es para ustedes.

A mis hermanos, que en los momentos en que las cosas se complicaban, estuvieron ahí para ofrecerme su ayuda, su compañía y su confianza. Gracias por ser parte fundamental de mi vida.

A mi amigo Enrique Chavarría, mi hermano de otra madre, quien fue una de las personas que más me ayudó a superarme. Siempre estuvo dispuesto a apoyarme con lo que podía, y nunca dudó en mostrarme su confianza. Sus palabras de aliento y su ejemplo me motivaron a aspirar a ser un gran profesionista, como él. Gracias por estar ahí en cada paso de este camino.

A mis maestros, por compartir su conocimiento con pasión, por exigir siempre lo mejor de mí, y por ser ejemplos de dedicación y compromiso con la educación. De cada uno aprendí algo que llevaré conmigo siempre.

A mi padrino Rodrigo, quien me brindó la oportunidad de estudiar y trabajar al mismo tiempo. Gracias a su generosidad y confianza, pude costear mi estancia en la universidad y contribuir también al bienestar de mi familia. Nunca olvidaré esa oportunidad que me abrió caminos.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi alma máter, por permitirme estudiar la carrera de mis sueños. Aquí encontré las herramientas para superarme académicamente, desarrollar mi vocación y formar mi identidad como profesionista.

Al Dr. Rubén López, por ser una guía invaluable durante mi estancia académica. Su paciencia, sus enseñanzas y sus ejemplos me ayudaron no solo a realizar prácticas importantes para mi formación, sino también a crecer como estudiante, a confiar en mis capacidades y a valorar el esfuerzo de querer innovar mi entorno.

A todos ustedes: gracias por acompañarme en este viaje, por creer en mí cuando yo dudaba, y por hacer posible que hoy pueda mirar hacia atrás con orgullo y hacia adelante con esperanza.

Índice de contenido

Resumen.....	viii
Introducción.....	1
Objetivos	2
Objetivo General	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	2
Hipótesis alternativa.....	2
Hipótesis Nula.....	3
Revisión de literatura	4
Escasez de Agua y la Necesidad de un Uso Eficiente.....	4
Implementación de Sistemas Domóticos para la Gestión del Agua en Invernaderos y Túneles	4
Comunicación y Monitoreo en Tiempo Real.....	5
Beneficios del Sistema Domótico para el Cuidado del Agua y la Producción Agrícola.....	5
Materiales y métodos.....	7
Materiales.....	7
Métodos.....	11
Diseño del sistema automatizado.....	11
Programación del microcontrolador	11
Almacenamiento de datos en microSD.....	13
Ensamblaje del prototipo	13
Instalación en el invernadero.....	15
Resultados y Discusión	18
Pruebas de funcionamiento y monitoreo.....	19
Primera prueba – 29 de septiembre de 2023	19
Segunda prueba – 31 de octubre de 2023.....	20
Tercera prueba – 5 de noviembre de 2023.....	21

Funcionamiento del sistema con electroválvulas:.....	21
Cuarta prueba – 4 de diciembre de 2023.....	22
Quinta prueba – del 20 de marzo al 7 de abril de 2024.....	22
Análisis comparativo del consumo de agua.....	23
Validación de la sostenibilidad del sistema.....	24
Sostenibilidad ambiental.....	24
Sostenibilidad operativa.....	25
Sostenibilidad económica.....	25
Conclusión general de la validación.....	25
Recomendaciones	26
Citas Bibliográficas	27

Índice de imágenes

Ilustración 1 Ensamblaje del prototipo.	15
Ilustración 2 Análisis de datos mostrados por el IDE de arduino.	19
Ilustración 3 Implemento de los higrómetros en 6 plantas diferentes para su análisis.	20
Ilustración 4 Uso del prototipo en plantas de Cempasúchil (<i>Tagetes erecta</i>) para su análisis hídrico.	20
Ilustración 5 Uso de electrovalvulas para el funcionamiento del sistema preciso.	21
Ilustración 6 Recopilación de porcentajes de humedad en el cultivo de arándano (<i>Vaccinium corymbosum</i>).	23

Índice de cuadros

Tabla 1 Tabla de parámetros.	19
-----------------------------------	----

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema domótico de bajo costo para la monitorización y control de parámetros esenciales en invernaderos, como la temperatura, la humedad y el riego, utilizando tecnologías accesibles como Arduino o ESP32. El sistema propuesto emplea sensores que registran en tiempo real las variables ambientales, garantizando un entorno óptimo para el crecimiento de los cultivos.

El sistema se divide en dos módulos principales: un módulo de adquisición de datos y un módulo de comunicación. En el módulo de adquisición, los sensores conectados a la placa Arduino/ESP32 capturan continuamente información sobre temperatura y humedad del aire, así como la humedad del suelo. Estos datos son procesados y almacenados en una tarjeta microSD para su posterior análisis.

En el módulo de comunicación, el sistema está configurado para enviar alertas automáticas y actualizaciones en tiempo real a una aplicación de mensajería como Telegram o mensajería sms. Esto permite que el usuario reciba notificaciones sobre las condiciones del invernadero, lo que facilita la toma de decisiones rápidas, como activar o desactivar el sistema de riego de manera remota en función de los valores obtenidos por los sensores.

Además, el proyecto incluye la programación de condiciones de control que automatizan el riego del invernadero en función de los umbrales definidos para la humedad del suelo, optimizando el uso del agua y asegurando que las plantas reciban el riego adecuado de manera eficiente.

Con esta implementación, el sistema no solo mejora la eficiencia de la gestión del invernadero, sino que también minimiza el consumo de agua y energía, lo que lo hace una solución sostenible y escalable para aplicaciones en la agricultura moderna.

Palabras clave: Humedad, Datos, Comunicación, Telegram, Wi-fi, Arduino

Introducción

En las últimas décadas, el uso de tecnologías inteligentes y automatización renueva diversos sectores y ahora también la agricultura tiene su momento de inclusión, pues la creciente demanda por mejorar la eficiencia en el uso de recursos, como agua y energía, impulsa el desarrollo de sistemas que permiten una gestión precisa y eficiente en la producción de los invernaderos como entornos controlados han sido uno de los principales beneficiarios de estas innovaciones tecnológicas, dan camino a la optimización de las condiciones ambientales y el rendimiento de los cultivos.

El presente proyecto propone el desarrollo de un sistema domótico el cual se pretende utilizar tanto en invernaderos como macro túneles, este sistema pretende usar microcontroladores como Arduino y ESP32, con el fin de automatizar la monitorización de variables críticas como temperatura, humedad ambiental y del suelo y riego, este sistema no solo registra los datos en tiempo real, también ofrece la posibilidad de comunicarlos a través de una plataforma de mensajería instantánea como Telegram el cual pueden utilizar los agricultores para recibir alertas y actualizaciones de forma remota, los datos recopilados pueden almacenarse en una tarjeta microSD para su análisis posterior, esto ayudara a la toma de decisiones informadas sobre la gestión del cultivo.

El uso de tecnologías accesibles como Arduino y ESP32 en este contexto representa una solución innovadora, de bajo costo y eficiente, contribuye a la agricultura inteligente, además, de darle un uso sostenible de los recursos, este tipo de sistemas permite optimizar la productividad al mismo tiempo que se minimizan los desperdicios, especialmente en relación con el consumo de agua, un recurso cada vez más escaso.

En este trabajo se describen los componentes e implementación de este sistema, así como los beneficios que aporta en la gestión de invernaderos, a lo largo de esta investigación, se explorará la viabilidad de aplicar estos dispositivos en un entorno agrícola para su potencial en eficiencia operativa y sostenibilidad.

Objetivos

Objetivo General:

Diseñar un sistema domótico basado en tecnologías de la información y comunicación (TIC) para el monitoreo y gestión integral de las etapas fenológicas en cultivos de invernadero, con un enfoque en la mejora de la eficiencia operativa, el uso sostenible de recursos como agua, energía y la promoción de prácticas agrícolas respetuosas con el medio ambiente, contribuyendo así al desarrollo de una agricultura moderna y sostenible.

Objetivos específicos:

- Desarrollar e implementar un sistema domótico: Diseñar una plataforma de monitoreo utilizando sensores y dispositivos conectados, integrando tecnologías de automatización y control para permitir una gestión remota eficiente de las condiciones ambientales en el invernadero.
- Evaluar y optimizar la eficiencia energética y el uso del agua: Realizar un análisis detallado de los patrones de consumo energético y de agua dentro del sistema domótico, identificando áreas de mejora y proponiendo estrategias para optimizar el uso de estos recursos, contribuyendo así a la sostenibilidad y reducción de costos operativos.
- Evaluar el impacto ambiental y económico: Evaluar el impacto ambiental del sistema domótico y las prácticas agrícolas asociadas, considerando aspectos como la reducción de residuos, emisiones de gases de efecto invernadero y otros indicadores ambientales. Además, analizar la viabilidad económica del sistema, considerando el retorno de la inversión y la sostenibilidad financiera para los agricultores involucrados en el proyecto.

Hipótesis

- La implementación de un sistema domótico basado en microcontroladores como Arduino o ESP32, diseñado para monitorizar y controlar las variables ambientales (humedad, temperatura y riego) en invernaderos, integrado con la comunicación vía Telegram y almacenamiento en microSD, permite no solo optimizar el uso de recursos como el agua y la energía, sino también analizar de manera precisa las diferentes etapas fenológicas de las plantas. Esto mejora la eficiencia operativa y el rendimiento de los cultivos en comparación con los métodos tradicionales de control manual y monitoreo fenológico.

Hipótesis alternativa

- El uso de un sistema domótico basado en Arduino o ESP32 para la monitorización y control de las variables ambientales en invernaderos, junto con el análisis de las etapas fenológicas de las plantas, no mejora

significativamente la eficiencia en la gestión de recursos ni el rendimiento de los cultivos en comparación con los métodos tradicionales de control manual.

Hipótesis Nula

- La implementación de un sistema domótico basado en Arduino o ESP32 para la monitorización y control de las variables ambientales en invernaderos, así como el análisis de las etapas fenológicas de las plantas, no tiene ningún efecto significativo en la optimización del uso de recursos ni en el rendimiento de los cultivos en comparación con los métodos tradicionales de control manual.

Revisión de literatura

Escasez de Agua y la Necesidad de un Uso Eficiente

En muchas partes del mundo se alcanzó el límite en uso de agua, lo cual ha provocado una explotación excesiva de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, generando impactos negativos en el medio ambiente; en países como México, donde el riego depende en gran medida del agua subterránea, se observa un exceso en la extracción de este recurso lo que ha resultado en una disminución alarmante en los niveles de agua dulce almacenada en los acuíferos, además de que el 77% del agua concesionada en el país se destina al sector de la agricultura, lo que evidencia la urgencia de mejorar la eficiencia hídrica en esta actividad, ya que el uso ineficiente del agua no solo agrava la escasez sino que también favorece la degradación del suelo y la contaminación de cuerpos de agua por el arrastre de fertilizantes y agroquímicos, por lo que resulta indispensable implementar estrategias innovadoras que permitan racionalizar el uso del recurso hídrico y garantizar simultáneamente la sostenibilidad y productividad agrícola (CONAGUA, 2023; FAO, 2022)

Implementación de Sistemas Domóticos para la Gestión del Agua en Invernaderos y Túneles

El desarrollo de sistemas domóticos aplicados a la agricultura se presenta como una solución eficaz para enfrentar los problemas relacionados con el desperdicio de agua, ya que la domótica, entendida como la automatización y el control remoto de procesos, ha demostrado ser una herramienta útil para la optimización de recursos en diversas industrias, incluida la agrícola; en este sentido, los sistemas automatizados implementados en invernaderos y túneles permiten ejercer un control más preciso sobre factores críticos como la temperatura, la humedad y el riego, lo cual se traduce en un uso más eficiente del agua y un incremento en la productividad de los cultivos, por lo que se plantea la implementación de un sistema domótico que no solo almacene agua, sino que también active el riego de forma precisa a partir de la información obtenida por sensores de humedad del suelo, buscando así asegurar que las plantas reciban la cantidad óptima de agua durante sus etapas vegetativas, promover un desarrollo adecuado sin incurrir en excesos ni en deficiencias hídricas, y fundamentándose en la recopilación y análisis de datos en tiempo real mediante sensores de humedad del suelo, temperatura y humedad ambiental, los cuales permiten ajustar tanto la frecuencia como la duración del riego en función de las necesidades reales del cultivo, evitando así un manejo ineficiente del recurso, al tiempo que la automatización disminuye la necesidad de intervención humana y mejora el aprovechamiento del tiempo y los recursos disponibles (Ojeda-Bustamante et al., 2017; Guevara-García et al., 2021).

Comunicación y Monitoreo en Tiempo Real

Una de las características fundamentales del sistema domótico consiste en su capacidad para establecer comunicación en tiempo real con el usuario, dependiendo del tipo de microcontrolador utilizado, ya que la información relacionada con los eventos de riego, la temperatura y la humedad de las plantas puede transmitirse mediante distintos medios; por ejemplo, el uso de microcontroladores como el ESP32 permite la implementación de Telegram como canal de comunicación, el cual ofrece una conexión rápida y segura con el usuario al enviar notificaciones detalladas sobre las condiciones internas del invernadero y generar alertas ante la necesidad de riego, mientras que en sistemas que incorporan módulos GSM se puede optar por el envío de mensajes SMS con los valores registrados por los sensores y las acciones ejecutadas por el sistema, lo que favorece la supervisión remota del riego y asegura un manejo eficiente del recurso hídrico sin requerir la presencia constante del agricultor, además, esta comunicación en tiempo real puede complementarse con el almacenamiento de datos en una tarjeta microSD o en plataformas en la nube, lo que posibilita un análisis a largo plazo de los patrones de riego y de las condiciones ambientales, permitiendo así tomar decisiones informadas que incrementen la eficiencia del sistema y permitan ajustar sus parámetros conforme a las necesidades específicas de cada cultivo (Ramírez-Mendoza et al., 2020; Medina-Borja & López-Flores, 2021).

Beneficios del Sistema Domótico para el Cuidado del Agua y la Producción Agrícola

El uso de un sistema de riego automatizado y tecnificado ofrece múltiples beneficios, entre los cuales se encuentra el ahorro de agua, ya que proporciona únicamente la cantidad necesaria para cada planta y reduce significativamente el desperdicio; además, incrementa la eficiencia en el crecimiento de los cultivos al asegurar que las plantas reciban el volumen exacto de agua requerido para desarrollar de manera óptima sus etapas fenológicas, lo cual también contribuye a la reducción de costos al disminuir el uso innecesario de agua, el consumo de energía y los gastos de mantenimiento del sistema de riego, asimismo, promueve la sostenibilidad al conservar el agua un recurso cada vez más escaso y al fomentar un uso más responsable de los recursos naturales disponibles, por otra parte, este tipo de sistemas permite una mejor gestión agrícola al brindar datos precisos en tiempo real que apoyan la planificación del riego, al mismo tiempo, se reduce el estrés hídrico en las plantas mediante un suministro de agua adecuado que evita tanto la sequía como la sobresaturación, lo que mejora la salud general del cultivo, también, estos sistemas pueden integrarse con fuentes de energía renovable como los paneles solares, lo que disminuye el consumo energético y refuerza su carácter sostenible, por lo tanto, la implementación de sistemas domóticos para la gestión del agua en invernaderos y túneles se presenta como una alternativa viable y eficiente para aumentar la productividad

agrícola, reducir el desperdicio hídrico y asegurar un manejo sostenible de los cultivos, ya que la combinación entre sensores de humedad, almacenamiento de agua y sistemas de comunicación en tiempo real con el usuario permite optimizar el uso del recurso hídrico y fortalecer la seguridad alimentaria en zonas con escasez de agua, y al mismo tiempo, el análisis prolongado de los datos registrados contribuye a mejorar la eficiencia del sistema y adaptar su funcionamiento a las condiciones cambiantes del clima y a las necesidades específicas de cada cultivo (González-Ramírez et al., 2020; FAO, 2021).

Materiales y métodos

La presente sección describe de forma detallada los materiales que se utilizaron y los procedimientos metodológicos que se siguieron para el diseño, la construcción y la implementación de un sistema domótico de riego automatizado en un invernadero, cuyo objetivo principal fue optimizar el uso del agua a través del uso de sensores de humedad del suelo, la automatización del sistema de riego y la posibilidad de establecer comunicación remota con el usuario, con la finalidad de asegurar un suministro hídrico exacto durante las etapas vegetativas del cultivo, favorecer el desarrollo adecuado de las plantas y reducir al mínimo el desperdicio de agua

Materiales:

1. Componentes de hardware:

- Arduino o ESP32: Microcontrolador que servirá como la base para el sistema domótico.
- Sensores de temperatura y humedad:
 - DHT22 o DHT11: Sensores utilizados para medir la temperatura y la humedad del aire.
- Sensor de humedad del suelo:
 - YL-69 o capacitivos: Sensor que permite medir la cantidad de humedad en el suelo, esencial para determinar los tiempos de riego.
- Sistema de riego automatizado:
 - Electroválvulas: Válvulas controladas electrónicamente que abren y cierran el flujo de agua según las indicaciones del sistema.
 - Bomba de agua (si es necesario): En caso de que sea un sistema de riego por goteo o similar que necesite presión.
- Módulo de comunicación:
 - Módulo Wi-Fi (integrado en ESP32 o módulo ESP8266 para Arduino): Para la comunicación con una red local y el envío de notificaciones a Telegram.
 - Módulo GSM (opcional): En caso de que se prefiera enviar los datos a Telegram vía red celular en vez de Wi-Fi.
- Tarjeta microSD y módulo de almacenamiento:
 - MicroSD (con módulo SD para Arduino/ESP32): Para el almacenamiento local de los datos recopilados.
- Relevadores:
 - Para controlar los dispositivos de riego, como bombas de agua o electroválvulas.
- Fuente de alimentación:
 - Batería recargable o una fuente de alimentación adecuada para el Arduino/ESP32 y los sensores.

- Cableado y conexiones:
 - Conectores jumper, cables, protoboard o soldadura para hacer las conexiones físicas entre los componentes.
 - Display LCD (opcional):
 - Para mostrar datos en tiempo real en el propio sistema.
- 2. Componentes de software:**
- Arduino IDE:
 - Entorno de desarrollo para programar el Arduino o ESP32.
 - Bibliotecas de sensores:
 - Librerías específicas para interactuar con los sensores (por ejemplo, la biblioteca DHT para sensores de temperatura y humedad, o la SD para el módulo de microSD).
 - Telegram Bot API:
 - API de Telegram para configurar un bot que reciba y envíe mensajes con las lecturas del sistema.
 - Software de almacenamiento de datos:
 - Programa o scripts para gestionar el almacenamiento de datos en la tarjeta microSD.
 - Plataforma de gestión de invernaderos (opcional):
 - Si se decide usar alguna plataforma en la nube para almacenar los datos o gestionar el invernadero de manera remota, se necesitará un software adicional que funcione como puente entre los dispositivos y la red.
- 3. Otros recursos:**
- Computadora personal:
 - Para el desarrollo, programación y monitoreo de la información.
 - Herramientas de montaje:
 - Cinta aislante, destornilladores, alicates, y otros elementos que te permitan ensamblar el sistema físico.
- 1. Diseño del sistema**
- 1.1 Definición de requerimientos:
 - Determinar las variables ambientales que serán monitoreadas (temperatura, humedad del aire, humedad del suelo).
 - Establecer los umbrales de activación para el riego en función de los niveles de humedad del suelo y las condiciones climáticas.
 - Definir los métodos de comunicación y almacenamiento de datos (Telegram y microSD).
 - 1.2 Selección de componentes:
 - Seleccionar el microcontrolador (Arduino o ESP32) y los sensores que mejor se adapten a las necesidades del proyecto.
 - Elegir los actuadores, como las electroválvulas, para automatizar el riego.
 - 1.3 Esquematización del circuito:

- Diseñar un diagrama eléctrico que incluya las conexiones entre el microcontrolador, los sensores, los actuadores y los módulos de comunicación y almacenamiento.

2. Programación del sistema

- 2.1 Desarrollo del código:
 - Utiliza el Arduino IDE o PlatformIO para programar el microcontrolador.
 - Integra las bibliotecas necesarias para los sensores de temperatura, humedad y la microSD.
 - Desarrollar el código para leer los valores de los sensores, compararlos con los umbrales establecidos y activar las electroválvulas de riego cuando sea necesario.
- 2.2 Implementación de la comunicación con Telegram:
 - Configura un bot de Telegram para que el sistema envíe mensajes cuando se detecten cambios en las variables ambientales o cuando se active el riego.
 - Desarrolla el código para que los datos también puedan almacenarse en una tarjeta microSD.
- 2.3 Pruebas del código:
 - Realiza pruebas en un entorno controlado para verificar que los sensores registren correctamente los datos y que los actuadores respondan de manera adecuada.
 - Asegúrate de que la comunicación con Telegram funcione y que los datos se almacenen correctamente en la microSD.

3. Montaje e instalación

- 3.1 Ensamblaje del sistema:
 - Monta el sistema en una protoboard o en un PCB (si es necesario), conectando todos los componentes electrónicos.
 - Verifica que cada componente esté adecuadamente conectado y funcione correctamente.
- 3.2 Instalación en el invernadero:
 - Instala los sensores en las ubicaciones adecuadas dentro del invernadero para medir la temperatura, humedad del aire y del suelo.
 - Coloca el sistema de riego automatizado, conectando las electroválvulas a las fuentes de agua y al sistema controlado por el microcontrolador.

4. Pruebas en el invernadero

- 4.1 Monitoreo y recolección de datos:
 - Durante un periodo de tiempo definido (por ejemplo, varias semanas), registra los datos de temperatura, humedad y activación del riego.

- Monitorea el funcionamiento del sistema y la respuesta de los cultivos a las condiciones controladas.
 - 4.2 Evaluación de las etapas fenológicas:
 - Observa y documenta las etapas fenológicas de las plantas en el invernadero, relacionando estas etapas con los datos de riego y condiciones ambientales.
 - Evalúa si el sistema domótico influye positivamente en las diferentes etapas de crecimiento de las plantas.
 - **4.3** Análisis de eficiencia:
 - Compara la cantidad de agua utilizada antes y después de la implementación del sistema para evaluar la eficiencia en el uso de recursos.
 - Analiza los datos recolectados para identificar mejoras en el crecimiento de las plantas y la reducción de desperdicio de agua.
5. Análisis de datos
- 5.1 Análisis de datos almacenados en microSD:
 - Extrae y analiza los datos almacenados en la tarjeta microSD utiliza software de análisis de datos (como Excel, Python o R).
 - Realiza gráficos y tablas para visualizar los cambios en temperatura, humedad y frecuencia de riego.
 - 5.2 Análisis de mensajes de Telegram:
 - Revisa los mensajes enviados por el sistema a través de Telegram para evaluar la funcionalidad de las alertas en tiempo real.
 - Verifica si las respuestas y decisiones basadas en estas alertas ayudaron a optimizar el manejo del invernadero.
6. Validación del sistema
- 6.1 Pruebas de estrés:
 - Somete el sistema a condiciones extremas, como variaciones rápidas de temperatura o humedad, para asegurar de que pueda manejar los cambios sin fallar.
 - Verifica la durabilidad del sistema bajo las condiciones del invernadero.
 - 6.2 Comparación con métodos tradicionales:
 - Realiza una comparación con un sistema de riego manual, evaluando diferencias en el uso de agua, la salud de las plantas y los resultados de productividad.

Métodos

Diseño del sistema automatizado

Como punto de partida para el diseño del sistema se hizo una selección cuidadosa de las variables clave que se iban a monitorear dentro del invernadero dando prioridad a aquellas que tienen relación directa con el uso eficiente del agua debido a la creciente problemática por su escasez por lo que se definió que la humedad del suelo, la temperatura y la humedad relativa del ambiente serían las principales variables a registrar y controlar ya que influyen directamente en las necesidades hídricas de las plantas durante sus distintas etapas vegetativas luego de establecer estas variables se evaluaron diferentes plataformas de desarrollo y se decidió trabajar con dos microcontroladores de bajo costo pero con alta versatilidad como lo son el Arduino UNO y el ESP32 los cuales ofrecen facilidad de programación en lenguaje C++ además de permitir la integración de sensores y actuadores necesarios para lograr el control automático del riego, a partir de esta elección se investigaron y seleccionaron los sensores más adecuados como los sensores capacitivos para medir la humedad del suelo y los sensores ambientales DHT11 o DHT22 que permiten conocer la temperatura y la humedad relativa del entorno también se eligieron actuadores como relés y electroválvulas de 12V que son fundamentales para controlar el flujo de agua de forma precisa uno de los elementos clave del sistema fue la integración de un canal de comunicación con el usuario en tiempo real para lo cual se aprovechó la conectividad Wi-Fi del ESP32 con el fin de enviar notificaciones por medio de un bot de Telegram lo que permite al agricultor monitorear las condiciones del invernadero y el funcionamiento del sistema de riego de forma remota mientras que en el caso del Arduino se consideró el uso de un módulo GSM como alternativa para enviar mensajes SMS cuando no se cuenta con acceso a redes Wi-Fi; Además se incorporó un módulo de almacenamiento con tarjeta microSD para guardar los datos de humedad, temperatura, eventos de riego y fechas lo que proporciona un historial útil para tomar decisiones agronómicas más informadas y permite validar el comportamiento del sistema durante su operación continua con esto se cubrieron todos los aspectos técnicos y estratégicos necesarios para el desarrollo de un sistema domótico funcional escalable y adaptable a condiciones reales de producción tanto en invernaderos como en túneles de cultivo.

Programación del microcontrolador

Para la programación del sistema automatizado se utilizó el lenguaje de programación C++ implementado a través del entorno de desarrollo Arduino IDE el cual permite escribir, compilar y cargar el código directamente al microcontrolador mediante una conexión USB; en esta etapa se definieron todas las instrucciones que debía ejecutar el sistema como la lectura de sensores, la activación de actuadores, el almacenamiento de datos y la comunicación con el

usuario; cada componente utilizado en el sistema como los sensores de humedad, sensores DHT, relé, microSD y el módulo de comunicación requiere una librería específica que facilita su integración con el microcontrolador; estas librerías proporcionan funciones predefinidas que simplifican la lectura de datos o el envío de comandos y permiten identificar correctamente cada dispositivo mediante pines definidos y configuraciones propias; uno de los aspectos clave fue establecer intervalos de lectura apropiados para cada sensor para que el sistema obtuviera datos actualizados sin generar sobrecarga en el almacenamiento de la microSD ni saturar al usuario con mensajes innecesarios por Telegram; por ejemplo, se programaron las lecturas de humedad del suelo cada 10 minutos mientras que los parámetros ambientales como la temperatura y la humedad relativa se midieron cada 5 minutos.

Además, se diferenciaron claramente los pines digitales y pines analógicos del microcontrolador:

- Pines analógicos (A0-A5 en Arduino MEGA / múltiples pines ADC en ESP32): Son utilizados para sensores que entregan señales continuas o variables, como el sensor de humedad del suelo, ya que proporcionan valores en un rango de 0 a 1023 que representan el nivel de humedad detectado.
- Pines digitales (D0-D13 en Arduino / GPIOs en ESP32): Usados para actuadores o dispositivos que requieren señales de encendido/apagado (HIGH/LOW), como el relé que activa la electroválvula, o para sensores que entregan lecturas binarias o codificadas, como el DHT11/DHT22.

Durante la programación se aseguraron condiciones de lectura estables al evitar errores o fluctuaciones mediante funciones de control y validación de datos; además, se implementaron ciclos if y else que definieron la lógica de acción del sistema, por ejemplo, si el nivel de humedad está por debajo de un umbral específico se activa el riego y en caso contrario se mantiene inactivo; por otra parte, se programó la comunicación por Telegram utilizando la librería correspondiente para ESP32 lo cual permitió enviar mensajes automáticos al usuario con información sobre la humedad del suelo, temperatura, humedad ambiental y activación del riego; asimismo, en caso de usar Arduino UNO se consideró como alternativa el uso de un módulo GSM para el envío de mensajes SMS; de esta forma, se realizaron pruebas de validación para observar el comportamiento del sistema ante distintos niveles de humedad al simular condiciones reales de campo, estas pruebas ayudaron a ajustar la sensibilidad de los sensores y comprobar que los actuadores respondieran de manera adecuada; en consecuencia, se logró una programación robusta que garantiza el funcionamiento eficiente del sistema de riego automatizado.

Almacenamiento de datos en microSD

Para complementar el monitoreo del sistema y permitir un análisis posterior se implementó un módulo lector de tarjeta microSD conectado al microcontrolador; además, esta tarjeta permitió almacenar todos los datos registrados por los sensores y las acciones tomadas por el sistema; por otra parte, cada dato fue guardado con una marca de tiempo (timestamp) que indicaba la fecha y hora exacta de la lectura; asimismo, el formato utilizado fue de texto plano (CSV), lo cual facilita la exportación de los datos a programas como Excel o software estadístico para su análisis. Los registros incluyeron:

- Nivel de humedad del suelo (por sensor)
- Temperatura ambiental
- Humedad relativa del aire
- Estado del sistema de riego (activo/inactivo)
- Tiempos de activación y duración del riego
- Mensajes enviados al usuario

El código fue diseñado para escribir en la microSD de manera eficiente; además, se redujo la cantidad de escrituras innecesarias mediante condiciones que validaban si el cambio de estado del sensor era significativo; esto ayuda a prolongar la vida útil de la tarjeta y mejora el rendimiento del sistema; también se implementó un sistema de archivos rotativo en el que los registros se dividían por día; de esta forma, cada día generaba un nuevo archivo de registro, lo que facilita la organización y posterior análisis; en caso de fallo de comunicación por Wi-Fi, la microSD funcionó como respaldo local de los datos, lo cual asegura que ninguna información crítica se pierda; por último, este sistema de almacenamiento permite al usuario y al investigador contar con un historial completo de las condiciones del invernadero, lo que facilita decisiones informadas, análisis de eficiencia del riego y ajustes futuros al sistema automatizado.

Ensamblaje del prototipo

El prototipo desarrollado fue diseñado con la finalidad de ser versátil y portátil; por ello, permite su instalación tanto en invernaderos como en macro túneles; para lograrlo, se utilizó una caja plástica de control en la cual se integraron los dos microcontroladores principales, el Arduino UNO y el ESP32, que se encargan de procesar las lecturas de los sensores y ejecutar las acciones del sistema; en su interior se organizaron las conexiones hacia los diferentes componentes mediante cableado estructurado, lo que aseguró una comunicación eficiente y ordenada entre sensores, actuadores y el sistema de almacenamiento o envío de datos; inicialmente, la caja de control se instaló en el centro del área de cultivo,

lo cual facilitaba el acceso equidistante a las plantas monitoreadas; sin embargo, surgieron inconvenientes logísticos debido al paso de estudiantes de la universidad, ya que al transitar por el área tropezaban con los cables y generaban interrupciones; en un segundo intento, se ubicó la caja encima del cultivo suspendida con soportes; no obstante, esta solución provocó inestabilidad a causa del viento, que movía los cables y ocasionaba pérdida de datos; para corregir estos problemas, se optó por colocar la caja de control a un costado del cultivo y enterrar los cables por debajo del suelo, lo cual evitó tropiezos e interferencias mecánicas; todos los cables fueron recubiertos con aislante impermeable, lo que garantizó la seguridad eléctrica incluso en condiciones de humedad; en este primer análisis, el sistema fue implementado en un cultivo de frijol ejotero (*Phaseolus Vulgaris*) dentro de un invernadero con un sustrato de arena de alta retención de humedad; posteriormente, con el objetivo de mejorar el control del entorno y analizar el comportamiento del sistema en un espacio más reducido, el prototipo fue trasladado a un cajón de madera donde se sembraron plantas en menor cantidad, lo que permitió observar diferencias más marcadas entre las zonas húmedas y secas; esta configuración facilitó el registro de datos más definidos y permitió aplicar ajustes al sistema, como nuevas distancias de cableado, reconfiguración del código para realizar análisis más frecuentes y observar respuestas específicas de las plantas en un espacio controlado; con base en los resultados obtenidos, el sistema fue adaptado para un nuevo ensayo en un macro túnel ubicado en Zamora, Michoacán; esta zona presentó nuevos desafíos, principalmente relacionados con la conectividad de red; a diferencia del invernadero, donde se contaba con tomas de corriente eléctrica accesibles y conexión Wi-Fi estable, en el macro túnel no se logró establecer comunicación efectiva con la plataforma Telegram, ya que el ESP32 no logró conectarse a la red Wi-Fi disponible y el módulo GSM tampoco obtuvo señal suficiente para enviar mensajes SMS; ante estas limitaciones, se optó por activar únicamente el registro de datos local mediante la microSD, la cual fue integrada al interior de la caja plástica de control; en esta ocasión se trabajó con un total de 8 plantas divididas en dos grupos, 4 en etapa de crecimiento y 4 en etapa de producción, lo cual permitió obtener un análisis comparativo del nivel de humedad en función de la etapa fenológica de las plantas; el ensamblaje del sistema también fue modificado para adaptarse a la nueva distribución del cultivo; además, los sensores fueron reubicados estratégicamente para alcanzar las zonas de interés sin interferir con la infraestructura ya instalada en el lugar; en este caso, el sistema de riego no fue manipulado debido a que la zona ya contaba con su propio sistema automatizado. El objetivo fue únicamente realizar el monitoreo de humedad del sustrato y detectar posibles deficiencias o excesos de riego; en cuanto a la alimentación del sistema, se aprovechó la infraestructura de paneles solares instalada en la zona, lo que permitió el funcionamiento autónomo del prototipo sin necesidad de conexión directa a la red eléctrica; además, esta

fuente de energía resultó fundamental para mantener operativos los sensores y el módulo de almacenamiento durante toda la fase de análisis.

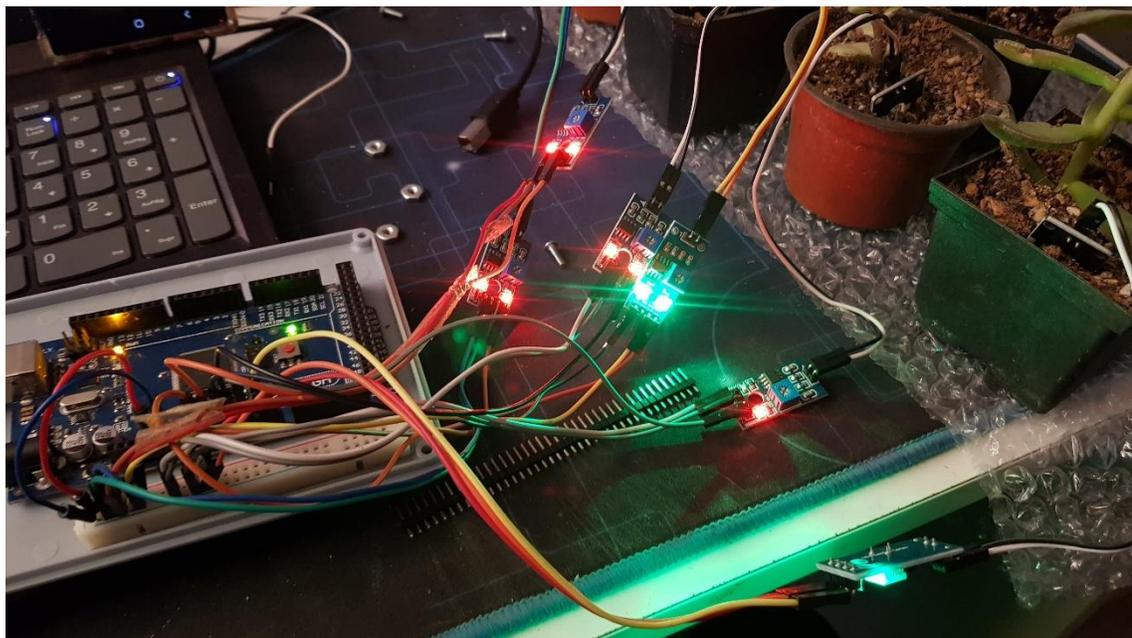


Ilustración 1 Ensamblaje del prototipo.

Instalación en el invernadero

Para esta etapa del proyecto, se autorizó el uso de un invernadero universitario ubicado en Torreón, Coahuila, el cual ofrecía las condiciones ideales para realizar pruebas controladas del prototipo; uno de los principales beneficios de esta instalación fue el acceso continuo a energía eléctrica, lo cual permitió alimentar el sistema de manera constante sin necesidad de soluciones externas como paneles solares; el sistema de control fue instalado dentro de una caja plástica que contenía los microcontroladores Arduino UNO y ESP32, junto con los demás componentes electrónicos; dicha caja se movió en tres ubicaciones distintas dentro del invernadero, con el fin de encontrar el punto óptimo para maximizar el rendimiento del sistema y minimizar las interferencias mecánicas o de señal; en cada una de estas ubicaciones, la caja fue conectada a una toma de corriente mediante un adaptador regulador de voltaje, el cual suministraba el voltaje necesario para cada componente; además, se tuvo especial precaución con el ESP32, ya que este microcontrolador opera con un voltaje menor (3.3V) en comparación con el Arduino (5V); para evitar daños, se verificó constantemente que los niveles de voltaje fueran adecuados para cada dispositivo; la longitud del cable de alimentación variaba entre 2 y 5 metros, dependiendo del punto de instalación dentro del invernadero; la fijación de la caja de control se realizó mediante arneses o abrazaderas, los cuales permitían sujetarla con firmeza a la estructura metálica del invernadero, manteniéndola en una posición segura y accesible; en cuanto a la conexión entre los sensores y la caja de control, se

utilizaron cables Dupont, cuya longitud también variaba entre 2 y 5 metros, dependiendo del marco de plantación y de la distancia entre las plantas a monitorear y la unidad de control; en esta instalación, uno de los principales objetivos fue garantizar el uso eficiente del agua, por lo tanto se incorporaron caudalímetros para medir con precisión la cantidad de agua utilizada en el riego, y electroválvulas para automatizar el flujo de agua hacia las plantas; estas electroválvulas se conectaban al sistema mediante relevadores, los cuales permitían accionar los dispositivos con el voltaje requerido y de forma segura; los relevadores se ubicaron en puntos estratégicos del sistema, en zonas accesibles para minimizar el uso excesivo de cableado y permitir una conexión directa y eficiente con el sistema de riego; las órdenes de activación de las electroválvulas se enviaban en función de las lecturas de humedad obtenidas por los sensores, asegurando así un riego preciso y adecuado, acorde a las necesidades del cultivo en tiempo real; esta instalación en el invernadero permitió una evaluación más controlada y técnica del funcionamiento del prototipo, comprobando su eficacia tanto en la recolección de datos como en la automatización del riego, contribuyendo directamente al uso racional del recurso hídrico en ambientes agrícolas cerrados; además, la calibración fue una etapa fundamental para asegurar que el sistema respondiera con precisión a las condiciones reales del cultivo, se enfocó principalmente en los sensores de humedad del suelo, ya que su correcta interpretación determinaría el momento exacto en que debía activarse el riego; para ello, se realizaron mediciones comparativas entre los valores entregados por los sensores y el estado físico real del sustrato (húmedo, seco o en punto óptimo); se seleccionaron varios puntos del invernadero, donde se colocaron los sensores a diferentes profundidades cercanas a las raíces de las plantas; en cada punto se registraron lecturas durante distintos momentos del día y bajo distintas condiciones ambientales; una vez recopilada la información, se establecieron umbral mínimo y umbral máximo de humedad; cuando el valor leído por el sensor caía por debajo del umbral mínimo, el sistema consideraba necesario activar el riego; si se encontraba dentro del rango óptimo, el sistema permanecía inactivo; esta lógica fue integrada al código y puesta a prueba durante varios días; asimismo, la calibración incluyó la verificación de la frecuencia de lectura y respuesta de los sensores, asegurando que no hubiera retardos que pudieran comprometer la decisión del sistema; también se evaluó el comportamiento de la electroválvula ante la señal del relé, ajustando la duración del riego en función del caudal, presión del sistema y necesidades hídricas del cultivo; de este modo, se definieron condiciones para evitar riegos innecesarios, como la programación de un margen de seguridad que impidiera el riego si las condiciones ambientales (alta humedad relativa) indicaban baja evapotranspiración; la calibración del sistema fue una fase crucial para garantizar lecturas precisas, respuestas oportunas del sistema de riego y confiabilidad en los datos almacenados; este proceso se llevó a cabo durante los primeros días posteriores a la instalación del prototipo, tanto en el invernadero como en los

ensayos de campo en el macro túnel, en primera instancia, se realizó una observación detallada de los valores entregados por los sensores de humedad del suelo, los cuales utilizan señales analógicas que el microcontrolador convierte en niveles digitales interpretables, por lo tanto estas lecturas se contrastaron con mediciones manuales y referencias agronómicas documentadas en literatura técnica sobre el cultivo de frijol ejotero (*Phaseolus Vulgaris*), con el objetivo de establecer los umbrales de humedad óptimos para la activación y desactivación del sistema de riego, además este proceso permitió validar la precisión de los sensores utilizados y asegurar que la lógica del sistema respondiera adecuadamente a las condiciones reales del sustrato, de este modo se lograron definir límites de operación confiables que fueron incorporados al código del microcontrolador para una respuesta automática eficiente frente a las variaciones de humedad en el cultivo. Se definieron dos umbrales principales:

- Umbral mínimo de humedad (activación): Cuando la lectura del sensor caía por debajo de este nivel, se activaba automáticamente la electroválvula para iniciar el riego.
- Umbral máximo de humedad (desactivación): Una vez alcanzado este límite superior, el sistema interrumpía el riego para evitar excesos y prevenir enfermedades derivadas del encharcamiento o saturación del sustrato.

Esta lógica de control fue programada con temporizadores y filtros de lectura que evitaban falsos positivos provocados por fluctuaciones momentáneas o ruido eléctrico, además se implementó una media móvil ponderado sobre los datos de humedad para suavizar las variaciones y permitir una lectura más estable y representativa del estado real del suelo, de forma paralela se ajustaron los intervalos de lectura de cada sensor considerando tanto la frecuencia necesaria para una toma de decisiones eficiente como el objetivo de no sobresaturar la memoria de la tarjeta microSD ni generar un exceso de notificaciones en la plataforma Telegram, por ejemplo las lecturas de humedad del sustrato se programaron cada 15 minutos mientras que las lecturas de temperatura y humedad relativa del ambiente se establecieron cada 30 minutos permitiendo así un equilibrio entre precisión y eficiencia del sistema, en el proceso de calibración también se evaluó el comportamiento de los actuadores frente a distintas combinaciones de valores registrados y se realizaron múltiples pruebas manuales y automatizadas en las cuales se simulaban distintos niveles de humedad y temperatura observando cómo respondían el relé la electroválvula y el flujo de agua, esto permitió verificar que las órdenes emitidas por el microcontrolador fueran coherentes con los datos leídos y que los tiempos de respuesta estuvieran dentro de parámetros aceptables, asimismo para evitar riegos innecesarios en días de alta humedad ambiental o tras eventos de precipitación natural cuando las pruebas se realizaron en espacios más abiertos se programó una condición lógica adicional en la que si la humedad relativa del

ambiente superaba el 90% durante un lapso prolongado el sistema suspendía temporalmente el riego asumiendo que el suelo podría estar en proceso de rehidratación natural, además se probaron distintas profundidades de instalación de los sensores de humedad para determinar en qué punto del perfil del sustrato la lectura era más representativa de la disponibilidad real de agua para las raíces y esto fue particularmente importante considerando que el cultivo de frijol ejotero tiene raíces superficiales que requieren monitoreo en los primeros 10 a 15 cm del sustrato.

Resultados y Discusión

Los datos obtenidos durante esta fase de calibración fueron registrados, analizados y utilizados como base para ajustar los parámetros del sistema a fin de asegurar una operación eficiente, adaptable y específica al cultivo evaluado, además este proceso sirvió para identificar posibles mejoras en la ubicación de los sensores, optimización del código y ajustes estructurales que se implementaron en los prototipos subsiguientes instalados en otras ubicaciones.

Parámetro	Valor / Intervalo establecido	Justificación / Observación
Humedad mínima (activación riego)	40% del sensor (valor aproximado: 600 ADC)	Nivel crítico para el cultivo de frijol ejotero; activa el sistema de riego.
Humedad máxima (desactivación)	70% del sensor (valor aproximado: 300 ADC)	Límite superior seguro para evitar encharcamiento y enfermedades.
Frecuencia de lectura de humedad del suelo	Cada 15 minutos	Permite tomar decisiones rápidas sin saturar la microSD.
Frecuencia de lectura de temperatura y HR	Cada 30 minutos	Variables ambientales con menor necesidad de respuesta inmediata.
Frecuencia de almacenamiento en microSD	Cada 30 minutos	Optimización del espacio y consumo energético.
Frecuencia de notificación a Telegram	Cada 1 hora (si hay cambios relevantes)	Se evita la saturación del bot; solo se notifica si hay eventos importantes.
Tiempo estimado de riego (electroválvula activada)	2 a 5 minutos por evento de riego	Depende del nivel de humedad previo y del tipo de sustrato.
Condición de suspensión por HR alta	>90% de humedad relativa por más de 1 hora	Prevención de riego innecesario en condiciones de alta humedad ambiental.

Ubicación ideal del sensor de humedad	Entre 10–15 cm de profundidad	Profundidad donde se concentran las raíces del cultivo evaluado.
Promedio móvil aplicado a lecturas	Media ponderada de 3 últimas lecturas	Suaviza valores atípicos y mejora la precisión del sistema.

Tabla 1 Tabla de parámetros.

Pruebas de funcionamiento y monitoreo

Para validar la operatividad y precisión del sistema domótico de riego, se realizaron distintas pruebas de funcionamiento en diferentes fechas y condiciones con el objetivo de observar la respuesta de los sensores, el comportamiento de los actuadores y la confiabilidad de la comunicación con el usuario.

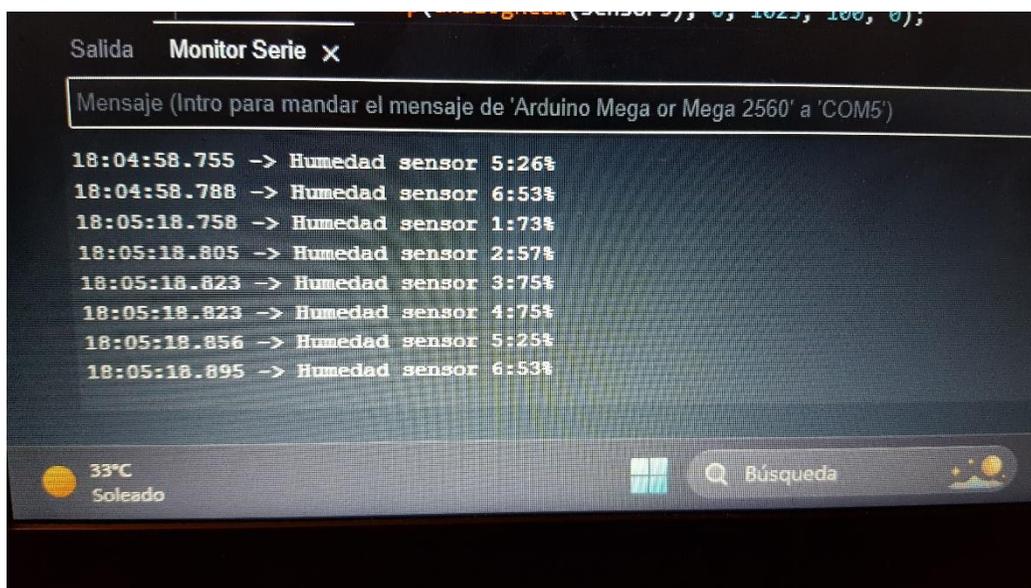


Ilustración 2 Análisis de datos mostrados por el IDE de arduino.

Primera prueba – 29 de septiembre de 2023

La fase inicial de monitoreo comenzó el 29 de septiembre de 2023; se trabajó con un grupo reducido de seis plantas con el objetivo de observar cómo respondía el sistema a pequeñas variaciones de humedad en el sustrato, y en esta prueba el sistema registró valores de humedad que oscilaron entre el 26 % y el 75 %, lo cual evidenció una lectura satisfactoria por parte del sensor capacitivo, además estos datos demostraron que el sensor era capaz de identificar condiciones tanto de humedad alta como baja en el suelo, también se evaluó la estabilidad de las conexiones entre los sensores y el microcontrolador, y se identificó un riesgo importante: al manipular o mover la caja de control o los sensores algunos cables

tendían a desconectarse parcialmente, lo que generaba fallos en la lectura, por lo tanto se enfatizó la necesidad de asegurar mecánicamente cada conexión mediante soldadura o conectores fijos para evitar interrupciones, finalmente la lectura de los datos se realizó directamente desde la interfaz del Arduino IDE en la pantalla del monitor serial, lo cual permitió observar en tiempo real las mediciones de humedad, temperatura y humedad relativa del ambiente y facilitó la validación de que el sistema funcionaba adecuadamente.



Ilustración 3 Implemento de los higrómetros en 6 plantas diferentes para su análisis.

Segunda prueba – 31 de octubre de 2023

Para una prueba más aplicada a un cultivo con valor ornamental y cultural se seleccionaron plantas de cempasúchil (*Tagetes erecta*), asociadas tradicionalmente con el Día de Muertos en México, y en esta fecha se observó que algunas plantas presentaban síntomas de marchitez, como hojas decaídas y pérdida de turgencia, a pesar de que el sustrato se notaba ligeramente húmedo al tacto, además el sistema reportó niveles de humedad del 17 %, lo cual según parámetros técnicos indica un déficit hídrico considerable, por lo que este hallazgo puso de manifiesto que el sustrato utilizado no tenía una adecuada



*Ilustración 4 Uso del prototipo en plantas de Cempasúchil (*Tagetes erecta*) para su análisis hídrico.*

capacidad de retención de agua, posiblemente debido a una textura muy arenosa o falta de materia orgánica, ya que aunque las plantas aparentaban humedad superficial el sensor detectó la falta real de agua disponible en la zona radicular, lo que ocasionó la pérdida de turgencia, así esta prueba confirmó la utilidad del sistema automatizado para detectar condiciones no evidentes al ojo humano y permitió una intervención oportuna en el manejo del riego, y además se demostró que los datos generados por los sensores podían ser utilizados como herramienta de diagnóstico agronómico para interpretar el estado fisiológico de las plantas en función de la humedad del sustrato.

Tercera prueba – 5 de noviembre de 2023

En esta fase del proyecto se integraron electroválvulas al sistema con el propósito de automatizar el proceso de riego en función de los datos registrados por los sensores de humedad del suelo, por lo tanto, se realizó una modificación en el código del microcontrolador al agregar una condición lógica que activara o desactivara la válvula dependiendo de los niveles de humedad detectados por los sensores.



Ilustración 5 Uso de electroválvulas para el funcionamiento del sistema preciso.

Funcionamiento del sistema con electroválvulas:

El código programado establece un umbral de humedad mínima, por ejemplo del 30 %, y si el sensor detecta un valor inferior a este límite, se activa un relé que a su vez energiza la electroválvula para permitir el paso del agua y realizar el riego, mientras que una vez que el sensor registra una humedad superior al umbral establecido, la válvula se cierra de forma automática para detener el riego, lo cual reduce significativamente el desperdicio de agua y asegura que las plantas reciban únicamente la cantidad necesaria, aunque durante la implementación inicial se consideró instalar una electroválvula por cada planta monitoreada, esta

estrategia resultó inviable debido a los altos costos de adquisición y al aumento en la complejidad del sistema, por lo que se optó por una distribución más eficiente al colocar una válvula por fila de cultivo, de manera que si la mayoría de las plantas en una fila presentan niveles de humedad por debajo del umbral, el sistema activa el riego únicamente en esa sección, mientras que en caso contrario se mantiene cerrada hasta que los valores indiquen déficit hídrico, lo cual permitió controlar mejor el recurso hídrico y reducir la inversión económica del sistema haciéndolo más escalable y adaptable a condiciones reales de producción, además de que los sensores continuaron mostrando lecturas estables y coherentes durante esta etapa, lo que consolidó su efectividad para la toma de decisiones automatizadas en el manejo del riego.

Cuarta prueba – 4 de diciembre de 2023

Durante esta etapa del proyecto se presentaron inconvenientes logísticos que obligaron a cambiar la zona de experimentación, ya que algunos componentes del sistema, como sensores y cables de conexión, fueron sustraídos o dañados dentro del invernadero universitario, lo cual impidió continuar con las pruebas en ese espacio, por lo que se decidió suspender temporalmente las pruebas y reorganizar el montaje del sistema para su implementación en una nueva ubicación.

Quinta prueba – del 20 de marzo al 7 de abril de 2024

El proyecto retomó su curso el 20 de marzo de 2024, cuando se trasladó el sistema completo a un nuevo lugar de análisis ubicado en Zamora, Michoacán, una región destacada por su producción de berries, y en esta ocasión el objetivo fue evaluar el comportamiento del sistema de monitoreo y riego en un cultivo de arándano azul (*Vaccinium corymbosum*), específicamente en condiciones de campo protegido bajo macro túnel, por lo que se instalaron ocho sensores de humedad de suelo distribuidos estratégicamente en una sección representativa del cultivo, lo que permitió identificar variaciones entre diferentes plantas y detectar posibles fallos en el sistema de riego localizado, y durante el monitoreo se observó que varias plantas presentaban niveles bajos de humedad en el sustrato a pesar de que el sistema de riego estaba activo, ya que el sistema domótico permitió identificar que en ciertas zonas los goteros estaban obstruidos, lo que generaba una falta significativa de agua en plantas específicas, y gracias a los datos capturados por los sensores y almacenados en la tarjeta microSD debido a que la señal Wi-Fi y GSM en la zona era limitada, se pudo evidenciar el problema con claridad, por lo que el análisis de datos permitió implementar correctivos puntuales en el sistema de riego tradicional del cultivo, demostrando que el sistema de monitoreo no solo funcionaba correctamente, sino que también resultaba útil para detectar fallos técnicos en sistemas ya instalados, lo que aumentaba su valor diagnóstico en campo, y esta fase de pruebas concluyó el 7 de abril de 2024 con la recopilación de una cantidad considerable de datos de humedad en diferentes condiciones y momentos del día, y aunque no se activó

directamente el riego automático, el sistema cumplió con éxito su función de detección, registro y notificación de las condiciones hídricas de cada zona analizada.



*Ilustración 6 Recopilación de porcentajes de humedad en el cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum*).*

Análisis comparativo del consumo de agua

El análisis comparativo del consumo de agua se realizó entre dos métodos de riego: uno tradicional y el sistema domótico automatizado desarrollado en este proyecto, y en ambos sitios de evaluación, tanto en el invernadero de la universidad en Torreón, Coahuila, como en el macro túnel en Zamora, Michoacán, se identificaron deficiencias comunes en los sistemas tradicionales, tales como obstrucción de goteros o tubos de PVC, desconexión de líneas de riego y desplazamiento de conductos por causas externas como viento o pisadas, lo que generó un desperdicio significativo de agua que en promedio osciló entre los 100 y 120 litros por semana, mientras que el sistema domótico permitió una irrigación eficiente al reducir considerablemente el uso de agua mediante la lectura continua de humedad en el sustrato con sensores conectados al

microcontrolador, logrando un consumo semanal de 65 litros, equivalente a 2.71 litros por planta distribuidos de manera uniforme y controlada según las necesidades de las plantas a lo largo de la semana, y durante la fase de floración y fructificación del frijol ejotero se ajustó el riego a 3.25 litros por planta por semana, aumentando el consumo total a 78 litros por semana, cifra que aún se mantuvo por debajo del promedio observado en los sistemas tradicionales, lo que evidenció la eficiencia del sistema inteligente, ya que este incremento del 20 % respondió a la mayor demanda hídrica de la planta en dicha etapa fenológica, y para asegurar una medición precisa del volumen de agua utilizado se integró un caudalímetro al sistema ubicado a la salida del tanque de almacenamiento de 200 litros, el cual se conectó a la tubería principal de PVC y cuantificó el flujo hacia las electroválvulas, permitiendo validar y registrar con exactitud los datos semanales de consumo de agua, por lo que el análisis demostró que el sistema domótico no solo disminuyó el desperdicio de agua, sino que también logró adaptarse a las condiciones específicas de cada etapa fenológica al responder a la variabilidad climática y a la demanda hídrica del cultivo, lo que se reflejó en un crecimiento saludable y estable de las plantas incluso en etapas críticas de su desarrollo al recibir el riego en el momento y volumen adecuados, y uno de los principales desafíos durante la operación del sistema fue el suministro de energía eléctrica, especialmente en zonas rurales o alejadas donde no siempre se contaba con una fuente estable de electricidad, por lo que en el caso del macro túnel en Zamora esta limitante se resolvió con un sistema de paneles solares preexistente en la zona que permitió mantener operativa la unidad de control sin interrupciones, aunque para futuras versiones del sistema se recomienda fortalecer la autonomía energética mediante baterías de respaldo o una fuente alterna que garantice la continuidad del servicio, por lo que este estudio comparativo valida la efectividad del sistema desarrollado no solo como una herramienta tecnológica para la automatización del riego, sino también como una solución viable para la optimización del recurso hídrico en la agricultura protegida.

Validación de la sostenibilidad del sistema

La sostenibilidad del sistema domótico diseñado se validó mediante el análisis conjunto de tres dimensiones fundamentales que fueron la ambiental, la económica y la operativa, ya que la integración de tecnologías de monitoreo, automatización y comunicación dentro del sistema permitió no solo alcanzar los objetivos planteados en cuanto a la eficiencia en el uso del agua, sino también aportar de manera concreta a la adopción de prácticas agrícolas más responsables y resilientes al generar una solución adaptable a diferentes contextos productivos y climáticos, lo que confirma su viabilidad como herramienta sostenible dentro del marco de la agricultura protegida y tecnificada.

Sostenibilidad ambiental

Desde el punto de vista ambiental, el sistema permitió una reducción comprobada del consumo de agua en cultivos bajo invernadero y macro túnel, ya que mientras

los sistemas tradicionales presentaban pérdidas de hasta 120 litros semanales debido a fugas, desconexiones o fallas en el sistema de riego, el sistema automatizado utilizó sensores de humedad que activaban el riego solo cuando era necesario, lo que generó un consumo promedio de entre 65 y 78 litros semanales según la etapa fenológica, representando así una disminución significativa en el uso del recurso hídrico al mejorar su aprovechamiento y reducir el impacto ambiental asociado al desperdicio, además, al incorporar componentes electrónicos de bajo consumo y un sistema centralizado de control, se logró minimizar el uso de energía, aunque se reconoció como área de mejora la futura integración de un sistema solar fotovoltaico que permitiría alcanzar una operación completamente autosuficiente desde el punto de vista energético y fortalecer la sostenibilidad ecológica del sistema.

Sostenibilidad operativa.

El sistema se diseñó para funcionar de forma autónoma con intervención mínima del operador, ya que mediante el monitoreo en tiempo real vía Telegram y el almacenamiento de datos en una microSD se garantizó un control constante sobre las variables críticas del cultivo sin requerir supervisión presencial continua, lo cual facilita su implementación en distintas regiones, disminuye la carga de trabajo humano y mejora la precisión en la toma de decisiones agronómicas, además, su diseño modular y flexible permitió adaptarlo a diferentes marcos de plantación, tipos de cultivos y condiciones climáticas, lo que valida su viabilidad técnica para ser escalado o replicado en otros escenarios agrícolas.

Sostenibilidad económica.

La viabilidad económica del sistema se refleja en el ahorro tangible de agua, lo cual reduce los costos de producción y mejora la rentabilidad a largo plazo, si bien la inversión inicial puede representar un gasto mayor en comparación con sistemas tradicionales, los beneficios operativos y la conservación de recursos compensan dicha inversión, además, al evitar el deterioro de las plantas por riego ineficiente o exceso de humedad se preserva la salud del cultivo y se incrementa la productividad potencial, el análisis comparativo del consumo de agua junto con el seguimiento fenológico realizado en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) evidenció que el sistema favorece el desarrollo vegetal al proporcionar riego en momentos críticos, evitando el estrés hídrico y fortaleciendo el vigor de las plantas.

Conclusión general de la validación.

En conjunto, los resultados obtenidos validan que el sistema domótico diseñado constituye una herramienta sostenible para el manejo del riego en invernaderos, ya que su capacidad para reducir el consumo de agua, operar de forma remota y adaptarse a distintas condiciones agrícolas lo posiciona como una alternativa viable para pequeños y medianos productores que buscan migrar hacia prácticas agrícolas más eficientes, inteligentes y respetuosas con el medio ambiente.

Recomendaciones

A partir del funcionamiento del prototipo y del análisis realizado, es posible incorporar implementos complementarios que fortalezcan la toma de decisiones basada en datos, como cámaras térmicas que permitan registrar el estado fisiológico de las plantas y del entorno mediante la detección de variaciones de temperatura, sistemas de visión artificial con cámaras capaces de identificar frutos o personas dentro del área cultivada, así como sensores de pH y conductividad que proporcionen información sobre la calidad del sustrato o del agua de riego, además, resulta viable integrar un anemómetro digital que registre la velocidad del viento en estructuras abiertas como macro túneles, lo cual permitiría optimizar aún más las decisiones relacionadas con ventilación, riego o protección de cultivos.

Citas Bibliográficas

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Estadísticas del agua en México, edición 2023. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura – Sistemas al límite. FAO. <https://www.fao.org>

Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J. M., Sifuentes-Ibarra, E., & Rojano-Aguilar, A. (2017). Automatización y control en sistemas de riego tecnificado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3), 717-728. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.1096>

Guevara-García, A. A., Alvarado-Sánchez, C. O., & García-Ruiz, F. J. (2021). Desarrollo de un sistema automatizado de riego por goteo controlado por sensores de humedad y temperatura. *Agrociencia*, 55(1), 89-101.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., Belmonte-Ureña, L. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Smart irrigation systems for agriculture: A review of the technological proposal from the patent analysis. *Agricultural Systems*, 178, 102763. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102763>

Castañeda-Miranda, R., Ventura-Ramos, E., García-Escalante, J. J., Torres-Pacheco, I., López-Mata, E., & Guevara-González, R. G. (2011). Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array. *Biosystems Engineering*, 110(3), 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.003>

García, L., Parra, L., Jiménez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>

INIFAP. (2019). *Recomendaciones técnicas para el cultivo del arándano (Vaccinium spp.) en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Morais, R., Fernandes, M. A., Valente, A., Serôdio, C., & Reis, M. (2008). A wireless sensor network for smart irrigation and environmental monitoring: A holistic approach for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(2), 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.004>

Pérez, R., & Vargas, A. (2018). Aplicación de sensores para el monitoreo de humedad en sustratos agrícolas. *Revista de Tecnología y Ciencias Aplicadas*, 6(2), 55–62.

Rodríguez, L., & Hernández, J. (2021). Uso de sensores capacitivos y caudalímetros para la gestión eficiente del agua en cultivos hortícolas. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(3), 27–35.