

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Implementación de una estación IOT de alerta al usuario en el monitoreo de humedad ambiental y del suelo, con sistema de riego automatizado en producción de tomate bajo invernaderos en el municipio de Sololá

Trabajo de graduación presentado por Wilson Adolfo Cuxulic Chalí para optar al grado académico de Licenciado en Tecnología de Sistemas Informáticos

Guatemala, 2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Implementación de una estación IoT de alerta al usuario en el monitoreo de humedad ambiental y del suelo, con sistema de riego automatizado en producción de tomate bajo invernaderos en el municipio de Sololá

Trabajo de graduación presentado por Wilson Adolfo Cuxulic Chalí para optar al grado académico de Licenciado en Tecnología de Sistemas Informáticos

Guatemala, 2025

Estudiante: Wilson Adolfo Cuxulic Chalí
Carne: 18659

Evaluador	Firma
Ing. Josué Herrera	
Ing. Arnoldo Bulux	
MBA. Omar Arreaga	

PREFACIO

El origen de este trabajo de graduación reside en la necesidad de incorporar tecnología en el sector agrícola de Sololá. Al observar que los agricultores locales, aunque poseedores de un valioso conocimiento ancestral, requerían herramientas modernas para enfrentar los retos del clima y optimizar el uso de recursos, surgió la idea de diseñar un sistema de monitoreo y riego automatizado para la producción de tomate en invernadero.

La creación de este sistema implicó un proceso práctico y estructurado. Iniciamos con una fase de entrevistas directas con los productores, ya que su experiencia fue la base principal para determinar los parámetros que la estación IoT debía medir y controlar. Luego, procedimos al desarrollo del prototipo, integrando los sensores, el microcontrolador y la aplicación web de visualización. Este diseño fue seguido por intensos periodos de prueba y calibración en campo, esenciales para asegurar que el sistema funcionara con precisión y fiabilidad dentro del entorno real del invernadero, antes de elaborar el producto final.

ÍNDICE

PREFACIO	iii
RESUMEN.....	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	4
V. METODOLOGÍAS	15
VI CRONOGRAMA.....	17
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
VIII CONCLUSIONES	32
IX. RECOMENDACIONES	33
X. BIBLIOGRAFÍA.....	35
XI. ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica respuestas a pregunta 1	20
Figura 2. Gráfica respuestas a pregunta 2	20
Figura 3. Gráfica respuestas a pregunta 3	21
Figura 4. Gráfica respuestas a pregunta 4	21
Figura 5. Gráfica respuestas a pregunta 5	22
Figura 6. Gráfica respuestas a pregunta 6	23
Figura 7. Gráfica respuestas a pregunta 7	23
Figura 8. Gráfica respuestas a pregunta 8	24
Figura 9. Gráfica respuestas a pregunta 9	24
Figura 10. Gráfica respuestas a pregunta 10	25
Figura 11. Gráfica respuestas a pregunta 11	25
Figura 12. Entrevista y recopilación de datos	26
Figura 13. Entrevista y recopilación de datos	27
Figura 14. Gráfica primera prueba	29
Figura 15. Gráfica segunda prueba	30
Figura 16. Prueba de red	34
Figura 17. prueba de red.....	34
Figura 18. Visita a invernadero.....	39
Figura 19. Visita a invernadero.....	39
Figura 20. Visita a invernadero.....	40
Figura 21. visita a invernadero	40
Figura 22. Visita a invernadero.....	41
Figura 23. Estación IoT implementado.....	42
Figura 24. estación IoT implementado	42
Figura 25. Sensor YL-69	43
Figura 26. Sensor YI-69	43
Figura 27. Sensor DHT22.....	44
Figura 28. Sensor DHT implementado.....	45
Figura 29. Microcontrolador ESP32.....	45
Figura 30. Electroválvula	46
Figura 31. Electroválvula	46
Figura 32. app-web primera versión.....	47
Figura 33. web-app primera versión.....	47
Figura 34. login web-app.....	48
Figura 35. vista general web-app.....	48
Figura 36. Alertas al usuario	49
Figura 37. Alertas al usuario	49
Figura 38. Datos recopilados.....	49
Figura 39. información de usuario y recopilación de datos.....	49
Figura 40. Botón de descarga de datos históricos.....	50
Figura 41. Control de accionamiento de electroválvula	50
Figura 42. riego automático habilitado	51
Figura 43. riego automático deshabilitado	51

Figura 44. riego manual deshabilitado.....	51
Figura 45. riego manual habilitado	51
Figura 46. Gráfica de humedad relativa.....	52
Figura 47. Gráfica temperatura ambiental.....	53
Figura 48. Gráfica Humedad del Suelo.....	54
Figura 49. Base de datos firebase	55
Figura 50. nodo de datos en tiempo real	55
Figura 51. nodo para control de riego.....	55
Figura 52. nodo para almacenar historial	56
Figura 53. datos exportados	57
Figura 54. Versión final de la estación IOT	57
Figura 55. pantalla OLED	58
Figura 56. Riego por goteo	58
Figura 57. Conexiones	59
Figura 58. Conexiones	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cronograma.....	17
Tabla 2. Matriz de validación.....	31

RESUMEN

El siguiente proyecto permitió desarrollar e implementar un sistema de monitoreo y activación de riego remoto basado en IoT. Este proyecto está orientado a la optimización del tiempo del agricultor, permitiéndole enfocarse en otras tareas como la poda y el cuidado del terreno dentro del invernadero. De igual forma, busca brindarle la posibilidad de desarrollarse profesional y académicamente, al disponer de más tiempo sin depender de la visita física al sitio para proceder con el riego.

Este proyecto específico se trabajó para ser adaptado al riego por goteo, integrando sensores, actuadores y el microcontrolador ESP32, diseñado para IoT, con bajo consumo energético según los sensores y actuadores conectados. El sistema se complementó con una aplicación web con login para monitorear el ambiente dentro del invernadero, bajo los requisitos básicos de contar con agua, energía eléctrica e internet disponible 24/7.

Durante la fase de pruebas, el sistema operó durante dos semanas: en la primera, con riego manual, los datos de humedad del suelo fueron más variables; en la segunda, con el riego automático habilitado mediante una electroválvula, la humedad se mantuvo dentro del rango establecido entre el 50 % y el 70 %, evidenciando mayor estabilidad y control.

Los resultados obtenidos demuestran que la propuesta responde directamente a las necesidades del sector agrícola local, al ofrecer una alternativa tecnológica accesible, eficiente y adaptable a las condiciones de conectividad de las áreas rurales. El consumo promedio registrado fue de 13.71 MB en 7 horas de funcionamiento, equivalente a un tráfico aproximado de 1.96 MB por hora, lo que confirma su viabilidad incluso con conexiones de internet limitadas.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura, pilar económico y cultural del municipio de Sololá, Guatemala, se enfrenta a una creciente presión derivada de la variabilidad climática y la necesidad imperante de optimizar los recursos hídricos. Históricamente, la producción agrícola en esta región se ha basado en un valioso conocimiento ancestral; sin embargo, esta dependencia de métodos tradicionales expone los cultivos de alto valor, como el tomate, a riesgos considerables, especialmente cuando se manejan bajo estructuras de invernadero donde las condiciones micro climáticas requieren un control minucioso y constante. La gestión ineficiente del riego y la ventilación, al carecer de datos precisos y en tiempo real, se traduce en un desperdicio de insumos, pérdidas económicas y una mayor vulnerabilidad a enfermedades.

En este contexto de desafíos, la tecnología de sistemas informáticos emerge como una herramienta fundamental para impulsar la resiliencia y la sostenibilidad. La adopción del internet de las Cosas (IoT) ofrece la capacidad de transformar la toma de decisiones, pasando de la intuición a la evidencia cuantificable.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Instalación implementación de una estación IOT de alerta al usuario en el monitoreo de humedad ambiental y del suelo , con sistema de riego automatizado en producción de tomate bajo invernaderos en el municipio de Sololá.

B. Objetivos específicos

1. Instalación de sensores DHT22 y YL-69 en invernadero para la toma de datos y ESP32 como procesador y transmisor de datos censados a firebase para su posterior visualización a distancia.
2. Desarrollar un sistema de visualización remota para el usuario, mediante una aplicación web, basado en los datos recopilados por los sensores DHT22 y YL-69, con el fin de facilitar una respuesta más acertada a las necesidades dentro del invernadero.
3. Implementar un sistema de recomendación y activación remota del riego, utilizando una electroválvula controlada en función de los datos recopilados por los sensores y los parámetros establecidos previamente por el usuario.

III. JUSTIFICACIÓN

Tradicionalmente, Sololá es uno de los municipios caracterizado por alta producción agrícola, producciones diversas que se han adaptado a las condiciones climáticas, edáficas y topográficas de la región lo que motiva a la búsqueda de alternativas para la adaptación a las condiciones diversas y variables que impactan la producción local, alternativas como macro-túneles e invernaderos.

El clima, como una variable fuera de control humano, sigue siendo el desafío principal, influyendo directamente en decisiones críticas relacionadas con el riego y ventilación. En respuesta a estas limitaciones, surge la propuesta de una estación de monitoreo automatizada con sensores DHT22 y YL69 para temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. La integración de esta tecnología que almacena los datos en la nube, acompañada de una aplicación web para acceso remoto en tiempo real. Adicionalmente, un sistema de riego automático basado en análisis de datos optimiza y controla de mejor manera el uso de insumos como agua, fertilizantes y energía, ya que las acciones se realizan solo cuando son necesarias. Esto también contribuye a la sostenibilidad ambiental, al mismo tiempo la reducción de costes de mano de obra.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Invernaderos y sus beneficios

El principal objetivo de los invernaderos es crear un ambiente controlado favoreciendo así el crecimiento de las plantas regulando factores como la temperatura, humedad y luz, lo que mejora el rendimiento de los cultivos incluso en condiciones climáticas desfavorables. Además, protege a las plantas de enfermedades, plagas, inclemencias del clima como lo son las heladas o sequías, estos factores ayudan a reducir el uso de pesticidas. Una ventaja fundamental es que posibilitan prolongar el período de cultivo, permitiendo a los agricultores sembrar durante todo el año. Esto favorece una mayor productividad, el aprovechamiento óptimo del espacio y disminuye la influencia de las variaciones estacionales. Además, al ser los invernaderos más eficientes en el consumo de agua y recursos, contribuyen a una agricultura más sostenible y comprometida con el cuidado del medio ambiente, (Wendell Berry, 2025) nos recuerda que "venimos de la tierra y retornaremos a ella", una visión que refuerza la importancia de cuidar los sistemas agrícolas. Al mejorar la eficiencia en el consumo de agua y recursos.

B. Humedad relativa, humedad del suelo y temperatura en la fisiología de las plantas en sistemas de invernadero

- 1. Humedad relativa:** representa la proporción entre el vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que este puede retener a una determinada temperatura (Telaumbanua, Priyonggo & Wardani, 2023). Este concepto es esencial en los sistemas de climatización y ventilación, ya que permite conocer el nivel de saturación del aire con respecto al vapor de agua. Conocer el porcentaje de humedad relativa es crucial para la apertura de cortinas, el encendido de ventiladores, humidificadores o calefactores, ya que la humedad relativa influye directamente en la transpiración de las plantas y la absorción de nutrientes. Un nivel inadecuado puede afectar la

fisiología del cultivo, reduciendo la tasa de fotosíntesis y favoreciendo el desarrollo de enfermedades fúngicas (Abidin, 2024).

2. **Humedad del suelo:** la humedad del suelo es vital para determinar si la planta necesita o no de riego (Hull et al., 2023). Esta decisión toma más sentido cuando hablamos de un ambiente controlado (invernadero). Como lo indica su definición, al ser un ambiente controlado, los cultivos no se encuentran expuestos al clima, y se tiene un mejor control de la cantidad de humedad que se necesita dependiendo de las necesidades de los cultivos (Kareem et al., 2021).
3. **Temperatura:** la temperatura es una magnitud que nos da noción del calor en el ambiente dentro del invernadero; esta magnitud afecta la velocidad de desarrollo, la absorción de agua y nutrientes, y la calidad del cultivo (Austria, Fabros, Sumilang, Bernardino & Doctor, 2023). La temperatura dentro del invernadero es distinta al exterior, lo que abre las posibilidades de cultivar fuera de temporada (Melal, 2024).

C. Gestión del riego en cultivos bajo invernadero

Los sistemas de riego varían según las necesidades de lo sembrado, dentro de los invernaderos se tiene los siguientes métodos de riego:

- a. **Riego por goteo:** en este método por irrigación, el agua pasa por una ductería con un sistema que ralentiza la salida del agua en los orificios, logrando un riego más preciso en la raíz de la planta (Britannica, 2023).
- b. **Riego por microaspersión:** el riego por microaspersión funciona por medio de un rotor o bailarina que dispersa el líquido por la mayor área posible, tal como sucede con un aspersor normal (ScienceDirect, 2023).
- c. **Riego con difusores:** este sistema es el mismo que los aspersores, la diferencia yace en que en este sistema no se tiene un rotor, es decir que el agua se dispersa hacia una sola dirección fija.

- d. **Riego subterráneo:** este sistema es muy parecido a la de goteo, la diferencia está en que el tubo pasa bajo tierra y la precisión mejora al administrar líquido donde yace la semilla o raíz del cultivo (Circuit Designer, s. f.).
- e. **Riego hidropónico:** este sistema de riego proporciona a las raíces de los cultivos una solución nutritiva equilibrada, disuelta en agua, que contiene todos los elementos esenciales para su desarrollo óptimo (Telaumbanua, Priyonggo & Wardani, 2023). Las plantas crecen directamente en esta solución mineral, asegurando una absorción eficiente de los nutrientes necesarios para su crecimiento saludable.
- f. **Riego por nebulización:** este método se emplean nebulizadores para poder expulsar el agua en forma de neblina, este método aumenta la humedad relativa y puede controlar este valor en áreas cálidas (Hull et al., 2023).

D. factores agronómicos clave de clima y suelo para cultivo de tomates en invernadero

El cultivo de tomate en invernadero requiere una gestión cuidadosa de los factores agroclimáticos, ya que estos están interconectados y su correcta regulación influye directamente en la producción y calidad del fruto (Abidin, 2024).

Factores clave:

- a. **Temperatura:** la planta prospera con temperaturas diurnas entre 20 y 25 °C y nocturnas entre 15 y 18 °C. Un rango adecuado entre el día y la noche es esencial para su desarrollo. Temperaturas extremas afectan el crecimiento, la polinización y la maduración del fruto. Además, si la temperatura del suelo baja de 12 °C, el sistema radicular se ve comprometido, afectando la parte aérea (Austria et al., 2023).
- b. **Humedad relativa:** debe mantenerse entre el 60 % y el 80 %. Un exceso de humedad favorece la aparición de enfermedades y problemas en la fecundación, mientras que niveles bajos generan estrés hídrico y dificultan la fotosíntesis (Hull et al., 2023).

- c. **Suelo:** aunque el tomate se adapta a distintos tipos de suelo, prefiere aquellos con buen drenaje y textura silíceo-arcillosa, ricos en materia orgánica. La humedad del suelo también es clave: debe mantenerse en un nivel óptimo para evitar estrés hídrico. Se recomienda que el suelo tenga una humedad entre 60 % y 70 % (Kareem et al., 2021), para favorecer el desarrollo y la absorción eficiente de nutrientes.

E. El mal control en el riego en invernaderos y sus consecuencias

La carencia del vital líquido en las plantas que lo requieren tiene un efecto negativo en su desarrollo e incluso puede morir a causa del estrés hídrico, pero si se excede en el riego también tiene resultados contrarios a los que se esperan, desde la exposición a hongos y plagas hasta el desperdicio de agua (Melal, 2024).

Cuando un sistema de riego no cuenta con un buen diseño, estructura sólida libre de fugas o control de apertura para el riego se exponen los cultivos a enfermedades y plagas, pero estos efectos negativos directamente en la planta no solo dan como resultado una pérdida económica muy notoria al no producir lo esperado para considerarse ganancia (Abidin, 2024). Un sistema de riego deficiente ya sea por diseño o manejo inadecuado, puede ocasionar erosión del suelo. La aplicación excesiva de agua sin un control adecuado puede generar escorrentía superficial, llevando consigo la capa más fértil del suelo. Esto provoca la pérdida de nutrientes esenciales y el deterioro de la calidad del suelo, impactando negativamente en la productividad de los cultivos.

F. Sistema IoT

IoT (Internet of Things) se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet para recopilar, intercambiar y analizar datos en tiempo real. Esto permite que objetos cotidianos, como sensores, electrodomésticos, maquinaria industrial o sistemas de monitoreo agrícola, funcionen de manera automatizada e inteligente (Telaumbanua et al., 2023).

En el contexto de la agricultura y los invernaderos, el IoT se utiliza para monitorear variables como la temperatura, la humedad relativa y del suelo, la iluminación y otros factores clave que afectan el desarrollo de los cultivos. Gracias a sensores conectados, los agricultores pueden recibir datos en tiempo real y tomar decisiones más precisas para optimizar la producción y reducir el consumo de recursos (Abidin, 2024).

G. Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22

El DHT22 (AM2302) es un sensor digital accesible y eficiente para medir temperatura y humedad relativa. Incorpora un sensor capacitivo de humedad y un termistor para detectar las condiciones del aire circundante, transmitiendo la información a través de una señal digital sin salida analógica. Se emplea en sistemas de control de temperatura, climatización, monitoreo ambiental en agricultura y diversas aplicaciones automatizadas (Electrónica DIY, 2025).

Características DHT22:

- Voltaje de operación: 3V - 6V DC
- Rango de medición de temperatura: -40 °C a 80 °C
- Precisión de medición de temperatura: $\leq \pm 0.5$ °C
- Resolución temperatura: 0.1 °C
- Rango de medición de humedad: de 0 a 100 % RH
- Precisión de medición de humedad: 2 % RH
- Resolución Humedad: 0.1 % RH
- Tiempo de sensado: 2 s
- Interface digital: single-bus (bidireccional)
- Modelo: AM2302
- Dimensiones: 20*15*8 mm

- Peso: 3 gr.
- Carcasa de plástico blanco

H. Sensor de humedad del suelo YL-69

El sensor de humedad del suelo YL-69 funciona midiendo la resistencia entre dos electrodos insertados en el suelo. Esta resistencia varía según la humedad del suelo: cuanto más húmedo sea, menor será la resistencia, y viceversa (Hull et al., 2023).

Características YL-69:

- Voltaje de alimentación: 3.3 V – 5 V DC
- Voltaje de la señal de salida: 0~5 V (Analógico)
- Salida digital de comparador LM393 SMD
- Corriente: 35 mA
- Tamaño: 60 x 20 x 05 mm

I. Microcontrolador ESP32 y firebase como base de datos

El microcontrolador ESP32 es un dispositivo compacto y versátil que combina procesamiento eficiente con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo hace ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), automatización y monitoreo en tiempo real.

Por otro lado, Firebase es una plataforma de Google para el desarrollo de aplicaciones, que ofrece una base de datos en la nube con almacenamiento en tiempo real y sincronización automática (Austria et al., 2023). Esto permite a los dispositivos conectados, como el ESP32, enviar y recibir datos sin necesidad de servidores adicionales.

Ambas se complementarán esto nos permite poder almacenar datos de los sensores DHT22 y YL-69 y acceder a estos datos en tiempo real desde cualquier dispositivo dando lugar a una integración IoT en el área agrícola, abriendo la posibilidad de hacer un cálculo por medio de estos datos y automatizar procesos como el riego administrando así de

mejor manera el líquido basado en los parámetros correctos en los sensores dependiendo el tipo de cultivo que se tenga en el invernadero.

J. Electroválvula

La electroválvula es un componente esencial en los sistemas de riego automatizados, ya que regula el flujo del agua mediante un mecanismo electromagnético controlado electrónicamente. Cuando el solenoide recibe una señal eléctrica proveniente del microcontrolador (ESP32), abre o cierra el paso del agua según los valores de humedad detectados en el suelo (Electrónica Diy, 2025).

En el sistema IoT desarrollado para el cultivo de tomate bajo invernadero, la electroválvula se conecta a un módulo de relé, que actúa como intermediario entre la lógica de control y la potencia eléctrica, garantizando una conmutación segura (Rika Sensor, 2025). Su uso permite automatizar el riego con base en umbrales de humedad predefinidos, optimizando el consumo de agua y reduciendo la intervención humana.

De esta manera, la electroválvula constituye el vínculo entre la medición de datos y la acción física, traduciéndose en una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico dentro del invernadero (MAGA, 2024).

K. La importancia de los sensores en invernaderos

Hoy en día encontramos distintos sensores para la toma de datos y para implementación en cualquier situación cotidiana o industrial, en la agricultura tenemos una variedad extensa de sensores que nos ayudan a medir variaciones climáticas en el aire y suelo dando así más posibilidades de acierto a la producción establecida como meta e incluso ahorro de recursos económicos al optimizar los recursos de tratamiento del cultivo y los recursos naturales.

L. Requerimientos para una integración IoT en la agricultura

Para determinar los requerimientos para la integración de un sistema IoT en un invernadero debemos analizar el término IoT (Internet of Things o en español Internet de las cosas), no debemos traducirlo de forma explícita, la interpretación de este término será definido de diferentes maneras pero todas ellas nos llevarán a un resultado idéntico, El internet de las cosas se refiere a la integración de internet en distintos dispositivos para poder recopilar datos y realizar una acción en base al resultado del análisis de esos datos (Telaumbanua, Priyonggo & Wardani, 2023), lo requerido para que este sistema sea funcional se resume en lo siguiente:

1. Energía eléctrica para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos.
2. Internet para el envío de los datos a un almacenamiento en la nube para su posterior análisis.
3. Sensores que nos resuelvan el actual reto, por ejemplo, si necesito que una luz encienda solo si detecta movimiento o carencia de luz, necesitaría sensores de luz y de movimiento.
4. Un microcontrolador que nos intercomunique a internet, es decir, ya que tenemos los datos recopilados, necesitamos que un dispositivo mande todo esto a través de internet a nuestro almacenamiento en la nube.
5. Actuador, el actuador es aquel dispositivo que realiza la acción en base al resultado del análisis de los datos recopilados por los sensores.
6. Base de datos: hay distintas bases de datos para poder realizar un sistema IoT y todas deben tener la característica de baja latencia, escalabilidad y procesamiento en tiempo real.

M. Tecnologías para la medición de la humedad del suelo

1. **Sensor de capacitancia:** los sensores de capacitancia son ampliamente preferidos en invernaderos por su bajo costo, tamaño compacto y su funcionamiento estable en la mayoría de los tipos de suelo (Rika Sensor, s. f.). Funcionan midiendo la humedad a través de los cambios dieléctricos que ocurren cuando el agua se acumula o se reduce alrededor de las sondas. Esta tecnología es moderadamente precisa y es el estándar

industrial accesible, a diferencia del sensor resistivo simple (como el YL-69), que es más susceptible a la corrosión y la deriva de las lecturas (Hull et al., 2023).

2. **Reflectometría de dominio de tiempo (TDR):** la tecnología de TDR (reflectometría de dominio de tiempo) es el método de referencia cuando la máxima precisión en la medición del contenido volumétrico de agua es obligatoria. Su funcionamiento técnico se basa en enviar un pulso eléctrico a través de la sonda y medir el tiempo que tarda ese pulso en reflejarse. Esta precisión es particularmente útil en suelos con salinidad variable, donde otros sensores pueden fallar o dar lecturas erróneas (Rika Sensor, s. f.). TDR es el ideal para estudios de investigación detallados, pero su alto costo de adquisición y su complejidad de calibración lo hacen inadecuado para un sistema de alerta al usuario diseñado para ser accesible (Kareem et al., 2021).
3. **Bloque de yeso:** el bloque de yeso representa una alternativa robusta que mide la tensión del agua del suelo, no directamente el volumen de agua. El sensor incorpora dos electrodos incrustados en un bloque de yeso, detectando esta tensión mediante los cambios en la resistencia eléctrica entre ellos (Rika Sensor, s. f.). Su principal limitación es el tiempo de respuesta lento, lo que lo descarta para un sistema de riego automatizado que requiere decisiones en tiempo real basadas en umbrales. No obstante, destaca por ser confiable en suelos salinos o gruesos, donde otros sensores enfrentan problemas de precisión (Abidin, 2024).

N. Sensor de humedad relativa más usados en invernaderos

1. **Sensor de humedad capacitiva:** los sensores capacitivos, como el integrado en el DHT22, son fundamentales para monitorear la HR en el ambiente del invernadero. Son ampliamente utilizados debido a su respuesta rápida, su alta precisión y sus bajos requisitos de mantenimiento (Rika Sensor, s.f.). Esto es vital, ya que un cambio rápido de HR exige una acción inmediata en la ventilación. El principio de trabajo es la detección de cambios en la constante dieléctrica de un material higroscópico. A medida que el aire retiene más vapor de agua, la capacitancia del sensor cambia, dándome una lectura precisa del nivel de saturación ambiental. Su estabilidad por períodos prolongados lo hace idóneo para el monitoreo continuo de mi estación (Hull et al., 2023).

- 2. Sensor de humedad psicrómetro:** el psicrómetro representa el estándar de alta precisión en la medición de la humedad relativa. Su funcionamiento es ingenioso: utiliza dos termómetros, uno de bulbo seco y otro de bulbo húmedo, y la diferencia de temperatura entre ambos se usa para calcular la HR (Rika Sensor, s. f.). A pesar de su exactitud, el Psicrómetro no está diseñado para monitoreo continuo ni para mi aplicación IoT en tiempo real. Exige un alto mantenimiento, como mantener húmedo el bulbo constantemente, lo que lo restringe a ser una herramienta de calibración o de investigación en condiciones controladas, y no es viable como sensor de campo para mi sistema automatizado (Abidin, 2024).

O. Sensores de temperatura más usados en invernaderos

- 1. El termistor:** el termistor es el componente fundamental para el monitoreo del aire, y esta tecnología es la que se integra internamente en el DHT22 utilizado en el proyecto. Esta tecnología ofrece una medición rápida y una precisión excelente, generalmente entre ± 0.1 a 0.5 °C (Rika Sensor, s. f.). Esta combinación de exactitud y agilidad es clave para el sistema de alerta, ya que permite una respuesta inmediata a las variaciones de temperatura que impactan directamente la ventilación y la humedad relativa, parámetros esenciales para el cultivo de tomate (Hull et al., 2023). Su principio de funcionamiento se basa en que su resistencia eléctrica cambia con la temperatura. El tipo NTC (Coeficiente de Temperatura Negativa), el más común en aplicaciones de invernadero, opera de forma que, si el calor ambiental aumenta, la resistencia leída por el microcontrolador disminuye.
- 2. Detector de temperatura de resistencia (RTD):** se considera el estándar de referencia cuando se requiere la máxima precisión. Es un componente inherentemente más costoso debido a que utiliza materiales de alta calidad, como el platino, ofreciendo lecturas extremadamente estables con una precisión de o superior en amplios rangos (Melal, 2024). Técnicamente, su superioridad se justifica en la linealidad: su resistencia aumenta de forma casi perfectamente lineal con la temperatura. Si bien un RTD sería la elección óptima para detectar la temperatura del

suelo con rigor científico debido a su precisión, su elevado costo lo hace menos viable para una implementación accesible y escalable como la que se busca en Sololá.

- 3. Par termoeléctrico (termopar o termocupla):** es la opción más robusta y duradera, típicamente diseñada para entornos industriales y condiciones extremas. Se compone de dos metales distintos unidos en un extremo, donde un cambio de temperatura genera un pequeño voltaje que se mide para inferir el calor. La limitación para este proyecto radica en la precisión. Aunque soporta muy bien las fluctuaciones ambientales, su precisión es significativamente menor. Para el monitoreo detallado del microclima del tomate, donde los umbrales de alerta deben ser muy ajustados para prevenir enfermedades o estrés hídrico, esta tolerancia es un riesgo inaceptable, haciendo del termistor la elección más adecuada (Hull et al., 2023).

P. Protocolo HTTPS

Este protocolo nos ayuda a la comunicación cifrada entre la aplicación web y la base de datos, como función principal tiene el proteger los datos transferidos por internet, un ejemplo en este contexto, es la validación de credenciales, durante esta validación los datos no pueden viajar expuestos y el protocolo https nos ayuda a protegerlos cifrándolos y únicamente ser descubiertos por medio de una llave asegurando así la autenticidad y privacidad de la información.

Q. Protocolo WebSocket

Este protocolo nos ayuda a tener la información en tiempo real a la disposición del usuario, https al comunicarse con el servidor debe iniciar sesión cada vez que termine la interacción, en cambio este protocolo mantiene la sesión abierta y de esta forma podemos transferir constantemente datos y lograr una información en tiempo real.

V. METODOLOGÍAS

Etapa 1: Formulación de herramientas de recopilación de información

Recopilación de datos por medio de entrevista personales en campo a propietarios y trabajadores de la productora, los datos recopilados serán de vital apoyo para la calibración de sensores y análisis de datos para configurar los actuadores.

Etapa 2: Desarrollo de mockups y prototipos

Prototipar el proyecto (hardware y software), en esta etapa se le dará prioridad a la conexión entre hardware y software más que a la interfaz gráfica; del lado del hardware se usará protoboard para montar los dos sensores DHT22 y YL-69 para humedad relativa y humedad del suelo respectivamente, el microcontrolador ESP32, la electroválvula como actuador. En el lado del software se dividirá en dos entornos de desarrollo:

1. Interfaz y la representación gráfica de los datos recopilados por los sensores: esta aplicación será para Android y estará basado en el Framework React y JavaScript como lenguaje.
2. La programación del microcontrolador ESP32: para programar este microcontrolador se usará el Arduino IDE con el lenguaje C++ y los sensores funcionarán bajo a la librería de Adafruit que nos da soporte tanto para el DHT22 como para el YL-69.

Etapa 3: Período de prueba

Realizar pruebas y comparar los resultados, en esta etapa el sistema de medición de humedad relativa, temperatura, humedad del suelo y riego automático, se instalará en campo para encontrar posibles fallas que durante el desarrollo pudieron pasar desapercibidos y por ende afectar los resultados finales.

Etapa 4: Período de evaluación y calibración de estación IoT

En base a los resultados en las pruebas, se realizará una evaluación y reajuste tanto de sensores y actuadores como del mismo microcontrolador ESP32.

Etapa 5: Desarrollo de estación para producción

En esta etapa se elabora el diseño final en base a las pruebas previas, todos los puntos del prototipo que sumen al buen desempeño de la estación serán usados dentro del diseño final,

mas no los puntos negativos, estos serán reemplazados por diseño mejor adaptados para el buen funcionamiento.

Etapa 6: Implementación de estación con Sistema IoT

Con pruebas ya realizadas y verificando la viabilidad del sistema de medición de humedad relativa, temperatura, humedad del suelo y riego automático, se implementa y se apoya a los encargados con una inducción, además, en estas dos semanas se monitoreará constantemente para evaluar el buen funcionamiento de la estación agrícola IOT.

VI CRONOGRAMA

Cuadro 1. Cronograma

Actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Actividades previas al desarrollo																								
Formulación de herramientas de recopilación de información.	■	■	■																					
Desarrollo de mockups y prototipos.																								
Elaboración de mockups estación				■	■																			
Elaboración de mockups aplicación móvil.						■																		
Elaboración de prototipos en base a los mockups							■	■	■	■	■	■	■											
Período de prueba																								
Pruebas en sitio																	■	■						
Período de evaluación y calibración de estación IOT																								
Calibración de sensores en base a las necesidades encontradas.																								
Desarrollo de estación para producción																								
Desarrollo de producto final para su posterior implementación.																						■	■	
Implementación de estación con Sistema IOT																								
Finalización, entrega de proyecto análisis de resultados																							■	

Cronograma de ejecución 1

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Preguntas a agricultores emergentes y experimentados (9 encuestados).

Nota, estas preguntas se realizaron de forma verbal y solo se digitalizó posteriormente para poder desarrollar las gráficas.

- 1) . ¿Qué método de riego utiliza actualmente?
 - Manual (manguera o palangana)
 - Por aspersión
 - Por goteo
 - Otro: _____

- 2) . ¿Con qué frecuencia realiza el riego de sus cultivos?
 - Diario
 - Cada dos días
 - Cada semana
 - Según observe la necesidad

- 3) ¿Cómo decide cuándo regar sus cultivos?
 - Observando el suelo y las plantas
 - Con un horario fijo
 - Cuando tiene tiempo disponible

- 4) ¿Ha tenido problemas por exceso o falta de riego?
 - Sí, con frecuencia
 - Algunas veces
 - Nunca

- 5) ¿Cuenta con algún instrumento para medir temperatura o humedad del ambiente?
 - Sí
 - No

- 6) ¿Le gustaría conocer en tiempo real la humedad del suelo o la temperatura ambiente en su cultivo (invernadero o a la intemperie)?
 - Sí
 - No
 - No estoy seguro

- 7) ¿Cree que las condiciones del clima influyen en su decisión de riego?
 - Siempre

- A veces
- Casi nunca

8) Si su cultivo tuviera un sistema que riegue automáticamente cuando el suelo esté seco, ¿lo consideraría útil?

- Sí, sería muy útil
- Tal vez
- No lo necesito

9) ¿Tiene acceso a conexión Wi-Fi o datos móviles en su área de cultivo?

- Sí, buena conexión
- Sí, pero con dificultades
- No tengo conexión

10) ¿Estaría dispuesto a probar un sistema de riego automatizado con sensores y control por celular?

- Sí
- Tal vez
- No

11) ¿Considera que el uso de sensores o estaciones automáticas podría mejorar la productividad de su cultivo?

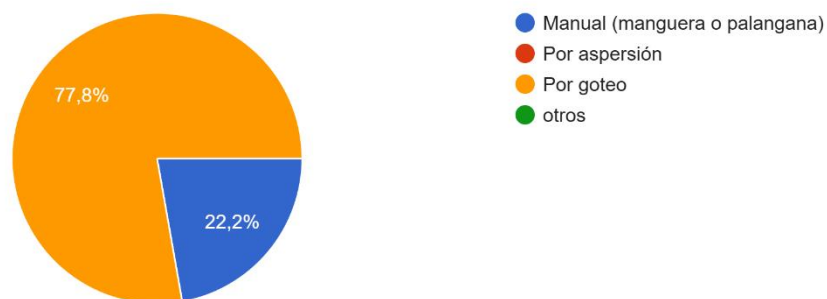
- Sí
- Tal vez
- No

B. Resultados de encuesta aplicado personas dentro del campo de la agricultura.

Figura 1. Gráfica respuestas a pregunta 1

¿Qué método de riego utiliza actualmente?

9 respuestas



El 77.8 % de los agricultores encuestados indicaron que utiliza el sistema de riego por goteo, mientras que el 22.2 % emplea métodos manuales como mangueras o palanganas.

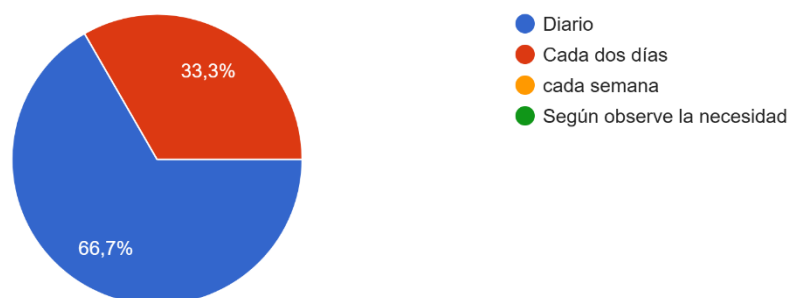
Este resultado demuestra que, aunque la mayoría ha adoptado sistemas más eficientes en el uso del agua, aún existe un grupo que depende de técnicas tradicionales.

El uso del goteo representa una base tecnológica favorable para implementar un sistema de automatización, ya que el proyecto IoT propuesto puede integrarse fácilmente con este tipo de infraestructura existente.

Figura 2. Gráfica respuestas a pregunta 2

¿Con qué frecuencia realiza el riego de sus cultivos?

9 respuestas



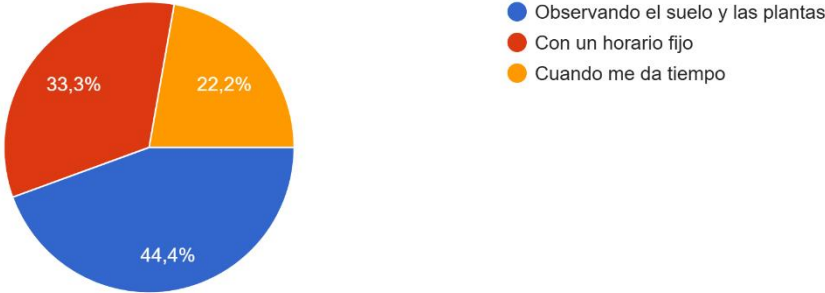
El 66.7 % de los agricultores riega a diario, y el 33.3 % lo hace cada dos días.

Esto refleja una práctica intensiva de riego, posiblemente motivada por la variabilidad climática de Sololá o la falta de indicadores precisos de humedad en el suelo.

Figura 3. Gráfica respuestas a pregunta 3

¿Cómo decide cuándo regar sus cultivos?

9 respuestas



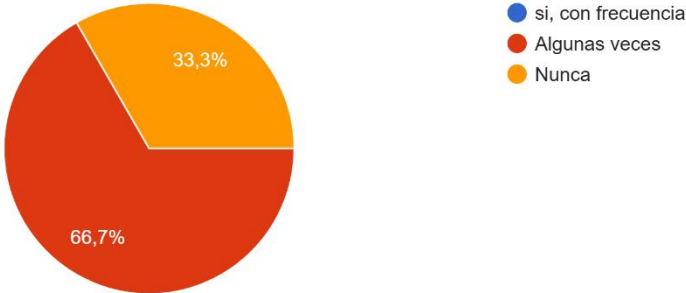
El 44.4 % decide regar observando el suelo y las plantas, el 33.3 % sigue un horario fijo, y el 22.2 % lo hace cuando tiene tiempo.

Estas respuestas evidencian que las decisiones de riego se toman principalmente de forma empírica, sin apoyo en instrumentos o datos.

Figura 4. Gráfica respuestas a pregunta 4

¿Ha tenido problemas por exceso o falta de riego?

9 respuestas

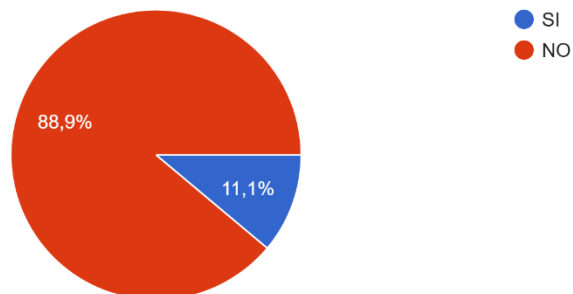


El 66.7 % mencionó haber tenido problemas algunas veces, mientras que el 33.3 % indicó que esto ocurre con frecuencia. Aunque este dato nos dice que la gestión actual debe tener muchas mejoras para no considerarse ineficiente no quiere decir del todo que este dato

negativo se debe únicamente a la mala gestión de riego, el clima también está involucrado como causante de este problema.

Figura 5. Gráfica respuestas a pregunta 5

¿Cuenta con algún instrumento para medir temperatura o humedad del ambiente?
9 respuestas



El 88.9 % no cuenta con ningún instrumento de medición, y solo el 11.1 % afirmó disponer de alguno.

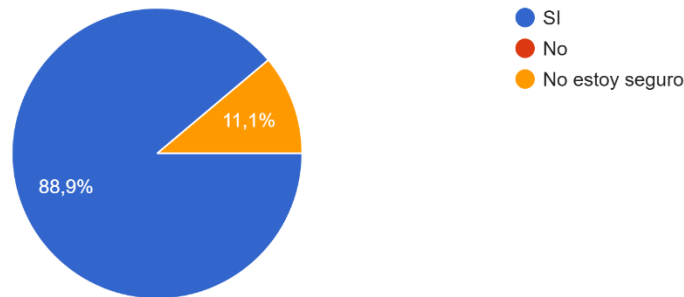
Esta carencia tecnológica refleja que la mayoría de los agricultores desconoce o no tiene acceso a herramientas de monitoreo ambiental, lo cual limita su capacidad de ajustar las prácticas agrícolas según las condiciones climáticas.

El sistema IoT propuesto cubrirá esta brecha, ofreciendo sensores accesibles y de bajo costo para obtener datos ambientales confiables.

Figura 6. Gráfica respuestas a pregunta 6

¿Le gustaría conocer en tiempo real la humedad del suelo o la temperatura ambiente en su cultivo (invernadero/interperie)

9 respuestas



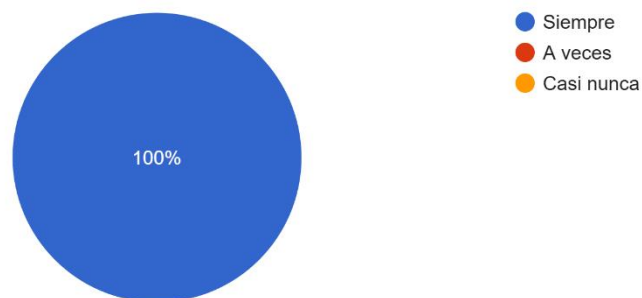
El 88.9 % respondió que sí le gustaría, mientras que el 11.1 % manifestó no estar seguro.

Este resultado demuestra un alto interés en la adopción tecnológica, especialmente si la herramienta es práctica y ofrece información útil.

Figura 7. Gráfica respuestas a pregunta 7

¿Cree que las condiciones del clima influyen en su decisión de riego?

9 respuestas



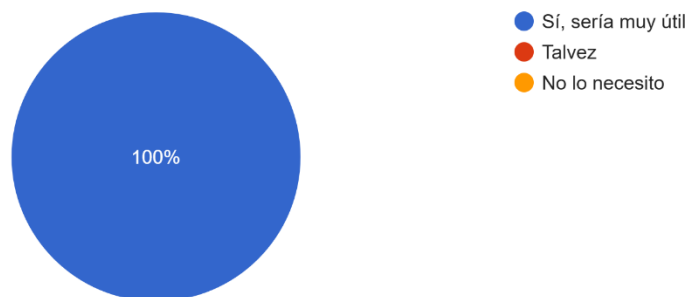
El 100 % de los participantes respondió “Siempre”.

Esta unanimidad confirma que los agricultores reconocen la relación directa entre clima y riego, pero también evidencia la necesidad de instrumentos que cuantifiquen esas variaciones.

Figura 8. Gráfica respuestas a pregunta 8

Si su cultivo tuviera un sistema que riegue automáticamente cuando el suelo esté seco, ¿lo consideraría útil?

9 respuestas



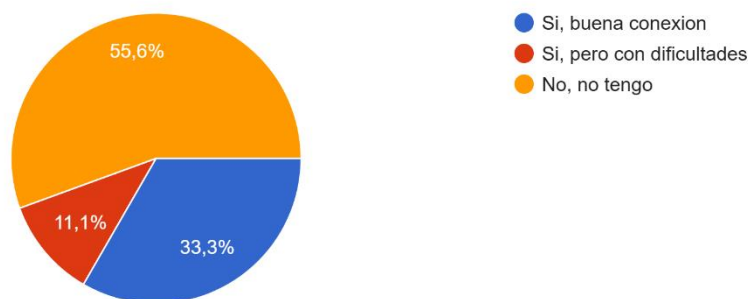
El 100 % de los agricultores considera que un sistema de riego automático sería muy útil.

Este nivel de aceptación sugiere que los productores están abiertos a soluciones tecnológicas, siempre que sean confiables y fáciles de usar.

Figura 9. Gráfica respuestas a pregunta 9

¿Tiene acceso a conexión Wi-Fi o datos móviles en su área de cultivo?

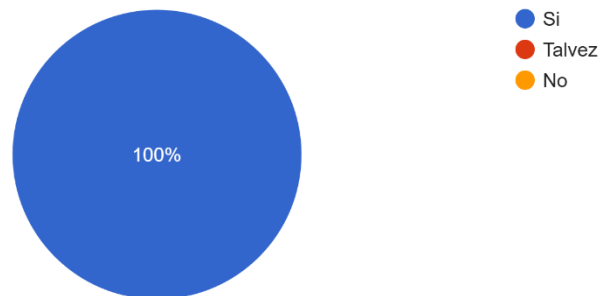
9 respuestas



El 55.6% de los encuestados manifiestan no tener internet, el 33,3% si cuenta con internet estable y el 11.1% manifiesta tener internet pero con dificultades, esto solo refleja que a pesar que los encuestados estaban interesados en la implementación de tecnología, la limitante es el internet.

Figura 10. Gráfica respuestas a pregunta 10

¿Estaría dispuesto a probar un sistema de riego automatizado con sensores y control por celular?
9 respuestas

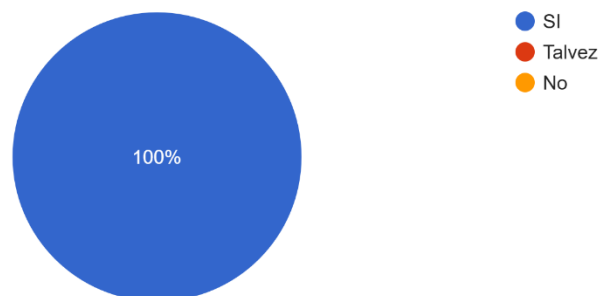


El 100 % manifestó que sí estaría dispuesto a probarlo.

Este resultado refuerza la aceptación social y práctica del sistema propuesto, mostrando una actitud positiva hacia la innovación tecnológica aplicada a la agricultura.

Figura 11. Gráfica respuestas a pregunta 11

¿Considera que el uso de sensores o estaciones automáticas podría mejorar la productividad de su cultivo?
9 respuestas



El 100 % de los agricultores respondió que sí, los sensores mejorarían la productividad. Esto demuestra una conciencia creciente sobre la tecnología agrícola y su impacto en la eficiencia y sostenibilidad de la producción.

Figura 12. Entrevista y recopilación de datos



Figura 13. Entrevista y recopilación de datos



C. Período de observación

El sistema transmitió información de humedad relativa, temperatura ambiente y humedad de suelo, además de eventos de control y estados de la electroválvula, en este período de prueba de dos semanas, el sistema IoT se sometió a observaciones permitiendo realizar una comparación entre el riego automático y el riego manual. En la primera semana, donde el riego fue manual, la humedad del suelo mostró una variabilidad considerable, fluctuando entre el 45 % y el 80 %, evidenciando una falta de estabilidad en el control hídrico. En contraste, durante la segunda semana, al

habilitar el riego automático controlado por la electroválvula, la humedad se mantuvo en un rango más constante, entre el 50 % y el 70 %, logrando una reducción del 35 % en la variación promedio, además, en cuanto al tiempo operativo, el sistema automatizado permitió reducir la supervisión manual del agricultor en aproximadamente 1.5 horas diarias que es el tiempo promedio que se tomaba el encargado para llegar al sitio y esperar a que termine el riego.

D. Consumo

El total de 13.71 MB en 7 horas equivale a un tráfico de aproximadamente 1.96 MB por hora, lo cual representa una carga mínima para la mayoría de los planes de Internet residencial o móvil. Este nivel de consumo demuestra que el sistema puede operar de manera sostenida incluso en redes con ancho de banda limitado.

E. Estabilidad de conexión

Durante la prueba, no se registraron desconexiones prolongadas. El sistema mantuvo una conexión estable con Firebase.

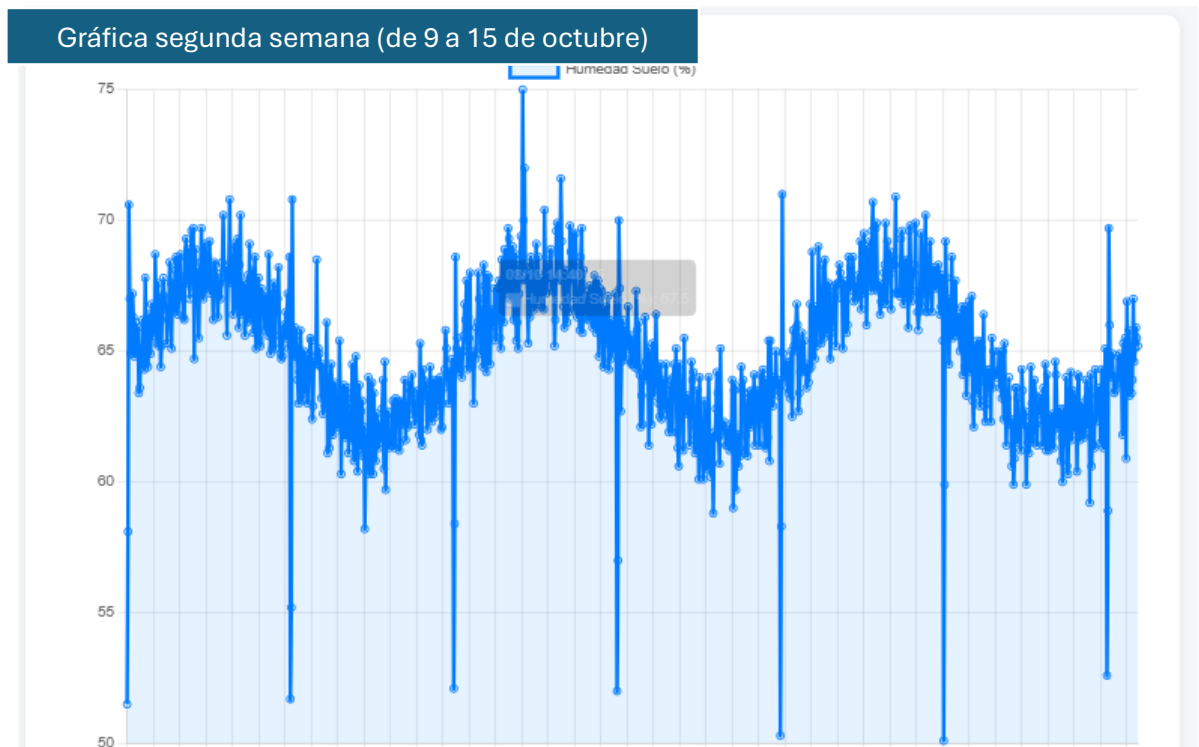
F. Datos para analizar

Con los datos guardados en lapsos de 10 minutos, podrán ser analizado en software como Excel o herramienta más robustas como powerBI o RapidMiner para poder incluso realizar una predicción con minería de datos.

G. Estabilidad en la humedad del suelo

la primera semana de implementación se deshabilitó el riego automático y todo fue manual la segunda semana el riego fue automático, programándolo a 65% como unidad máxima y 50% como unidad mínima, es decir que se debía mantener entre ese rango. El resultado fue el esperado, los datos de la primera semana fueron más variables y por lo tanto la gráfica fue más fluctuante, caso contrario a los datos de la segunda semana en donde se reflejó más estabilidad, a continuación, la comparación de gráficas entre ambas semanas.

Figura 15. Gráfica segunda prueba



Esto nos da una noción del alcance de este dispositivo, ya que actúa bajo parámetros del usuario, pero no depende del usuario para actuar, en la gráfica podemos ver mas estabilidad y control sobre la humedad en el suelo.

H. Matriz de validación

Tabla 2. Matriz de validación

Requerimiento	Descripción	Cumplimiento	Evidencia
Fuente de energía	Alimentación de sensores y microcontrolador	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Estación alimentada con fuente 5v y para la electroválvula adaptador de corriente 5V
Conectividad	Comunicación por medio de Wifi y los protocolos HTTPS y WebSocket	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Conexión continua con Firebase durante pruebas, la red usada fue l
Sensores	DHT22 y YL-69	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Datos de humedad y temperatura verificados
Microcontrolador	ESP32 con comunicación en tiempo real	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Código fuente funcional documentado
Actuador	Electroválvula con relé de control	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Pruebas de apertura y cierre automático
Base de datos	Firestore Realtime Database	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Nodo “actual” y “historial” en funcionamiento
Interfaz web	Aplicación funcional y responsiva	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Capturas y pruebas de control remoto
Validación en campo	Comparación riego manual vs automático	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Gráficas y análisis de estabilidad hídrica
Alertas al usuario	Espacio para informar al usuario sobre alguna anomalía	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Integrado en interface de usuario (web app)
Exportación de datos	Para un análisis mejorado, se tiene la opción de exportar los datos.	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Botón integrado en la interfaz gráfica.
Riego automático o manual (control remoto)	EL riego se puede activar de forma automática como de forma manual	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Botón integrado en la interfaz gráfica.
Instalación en invernadero	El dispositivo fue instalado en invernadero.	<input checked="" type="checkbox"/> Cumplido	Los datos recopilados fueron vitales para el análisis de resultados.

VIII CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto permitió desarrollar e implementar un sistema de monitoreo y activación de riego remoto basado en IoT, enfocado en optimizar el tiempo de trabajo del agricultor. Gracias a esta automatización, el productor puede concentrarse en otras labores importantes dentro del invernadero, como la poda o el mantenimiento del terreno, e incluso disponer de más tiempo para su crecimiento profesional o académico, sin necesidad de estar presente para realizar el riego.

El sistema fue diseñado para funcionar con riego por goteo, integrando sensores, actuadores y un microcontrolador ESP32, que destaca por su bajo consumo de energía y su capacidad para gestionar distintos dispositivos. Además, se complementa con una plataforma web que permite al usuario ingresar con su cuenta y supervisar las condiciones del invernadero en tiempo real. Para su correcto funcionamiento, el sistema requiere contar con agua disponible, conexión eléctrica e internet, elementos básicos para cualquier dispositivo IoT.

Durante la fase de pruebas, se evidenció una reducción del 35 % en la variabilidad de la humedad del suelo al comparar el riego manual con el riego automático, manteniéndose dentro del rango óptimo de 50 % a 70 %. Este control estable permitió evitar tanto la sobresaturación como la sequía en el cultivo, garantizando un equilibrio hídrico ideal, durante este período de pruebas también se pudieron validar los tiempo de reacción del dispositivo, el sistema está programado a no tardar más de 40 segundos en actuar, es decir que el tiempo de reacción va desde 1 segundo a 40 segundos.

IX. RECOMENDACIONES

La integración de un sistema IoT requiere de un servicio de internet con características mínimas de estabilidad y ancho de banda para asegurar su correcto funcionamiento. En este proyecto se comprobó que el consumo total de datos fue de 13.71 MB durante un período de 7 horas, lo que equivale a aproximadamente 1.96 MB por hora, es decir, menos de 5 kilobits por segundo de ancho de banda. Este consumo resulta insignificante para la mayoría de los servicios residenciales o móviles, por lo que no es necesario contratar planes de alto costo. Dadas las condiciones geográficas del departamento de Sololá, donde las zonas rurales presentan dificultades para acceder a servicios de internet cableado o enlaces de larga distancia (“punto a punto”), se recomienda el uso de conexiones satelitales o móviles. Los proveedores como Claro, Tigo y Starlink ofrecen cobertura en estas áreas y resultan adecuados para la estación IoT.

En el tema de mantenimiento y limpieza se recomienda establecer un plan de mantenimiento preventivo mensual que incluya la limpieza de sensores, verificación del estado de las conexiones eléctricas y calibración de los dispositivos de medición. Este tipo de mantenimiento incrementa la precisión de los datos y prolonga la vida útil del sistema.

En particular, Starlink, aunque representa un costo de adquisición más elevado, ofrece planes adaptables a diferentes necesidades. Si la estación IoT es el único dispositivo conectado, puede optarse por un plan económico con límite mensual de datos, suficiente para mantener la transmisión continua de lecturas y control remoto. Sin embargo, si se requiere conectar múltiples dispositivos (como cámaras, computadoras o teléfonos), se recomienda un plan residencial ilimitado, preferiblemente en su versión Lite, ya que permite velocidades que alcanzan hasta 200 Mbps de subida, garantizando una comunicación estable y sin interrupciones.

Las últimas recomendaciones surgen de las pruebas y momentos en los que no se pudo transmitir datos, debido a la caída de energía eléctrica, por lo que se considera la instalación de un panel solar que nos pueda entregar por lo menos 2 tomas de corriente DC de 12 v y mínimo 0.5 Amperios por cada toma (para el router y la electroválvula, además de 5v para la alimentación del microcontrolador ESP32 y sus sensores). Esta medida nos ayudará a tener siempre activo el dispositivo aun cuando la energía eléctrica general falle.

El dispositivo cuenta con sensores y componentes modulares, por lo que lo recomendado es que se cambien por lo menos a cada dos años (life expectancy, 2017) para garantizar que los datos sean tomados correctamente y disminuir el margen de error.

Figura 16. Prueba de red

Prueba de consumo



Figura 17. prueba de red



X. BIBLIOGRAFÍA

Austria, (2023). Development of IoT Smart Greenhouse System for Hydroponic
<https://arxiv.org/abs/2305.01189>

Britannica (AccessEngineering). (2023). The YL-38/YL-69 Water/Moisture Detector.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/mhe-lookup/atom-id/a67096dece50f29>

Electrónica Diy (2025) Sensor de humedad y temperatura DHT22

https://www.electronicadiy.com/products/sensor-de-humedad-y-temperatura-dht22?_pos=1&_sid=938c1c6c8&_ss=r

Electrónica Diy. (2025). Electroválvulas de riego automáticas 12V DC.
<https://www.electronicadiy.com>

Electrónica Diy (2025) Sensor de Humedad de Suelo Higrómetro

https://www.electronicadiy.com/products/sensor-de-humedad-de-suelo-higrometro?_pos=1&_sid=636a45c93&_ss=r

Electrónica Diy (2025) Esp-32 wifi + bluetooth con cable USB

https://www.electronicadiy.com/products/esp-32-wifi-esp8266-cable-usb?_pos=5&_sid=71adf129a&_ss=r

I Abidin. (2024). Automation of humidity in the greenhouses for plant cultivation. Bio-Conferences.
https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2024/15/bioconf_uicat2024_04004.pdf

INE (2009) Economía en el municipio de Sololá.

<https://departamentos.deguate.com/solola/economia-de-solola/>

INSIVUMEH. (2024). Estado del clima en Guatemala

https://insivumeh.gob.gt/?page_id=14371

Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) & AECID. (2022) Resultados del proyecto sobre cambio climático en Sololá.

<https://www.aecid.org.gt/noticias-cooperacion/icc-araucima-presento-resultados-de-proyecto-sobre-cambio-climatico-en-solola>

MAGA. (2024). Beneficios de los invernaderos. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala. <https://www.maga.gob.gt>

Melal, S. R. (2024). A machine learning method based on stacking of DHT22
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154324001443>

Ministerio de agricultura, ganadería y alimentación (2024) Estos son los beneficios de los invernaderos

<https://www.maga.gob.gt/estos-son-los-beneficios-de-los-invernaderos/>

Novagric Control climático (2024) Control de la Humedad Relativa en los cultivos en Invernadero

<https://novagric.com/control-de-la-humedad-relativa-en-los-cultivos-en-invernadero/>

Rikasensor (2025) ¿Qué tipos de sensores son los mejores para el monitoreo de invernaderos?

<https://www.rikasensor.com/es/blog/what-types-of-sensors-are-best-for-greenhouse-monitoring.html>

Rikasensor. (2025). Sensores para monitoreo de invernaderos. <https://www.rikasensor.com>

Sembralia (2020) Tomate en invernadero ¿Cuáles son los factores agronómicos clave de clima y suelo? Consejos para cultivo de tomates

https://sembralia.com/blogs/blog/tomate-en-invernadero?srsId=AfmBOopPwfonJzDT0ZGQHH9nQHfyfyi5_LSBZqau8r5ILX1pU0Dban5M

Sembralia (2020) Tipos de sistemas de riego en invernaderos. Ventajas y modos de uso. Trucos para ahorrar agua y ser eficientes

https://sembralia.com/blogs/blog/sistema-de-riego-en-invernaderos?srsId=AfmBOorImVUzgxqN_OloJ0-Swd1WehQkD0NXNkbjjeMLLb_aot5byaO

ScienceDirect (2023). Greenhouse monitor and control with LabVIEW using DHT22 sensor. https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/SSRN_ID3736660_code2083654.pdf?abstractid=3736660

Telaumbanua, M., Priyonggo, B., & Wardani, I. K. (2023). The feasibility study: Accuracy and precision of DHT22 in measuring the temperature and humidity in the greenhouse. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1230, 012146. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1230/1/012146>

S&P (2024) Humedad relativa, específica y absoluta

[https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/#:~:text=La%20humedad%20relativa%20\(Hr\)%20es,\(humedad%20absoluta%20de%20saturaci%C3%B3n\)](https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/#:~:text=La%20humedad%20relativa%20(Hr)%20es,(humedad%20absoluta%20de%20saturaci%C3%B3n))

Wala A. Kareem et al. (2021). Design of the Humidity and Temperature Controller Using DHT22, AH-300u, YL-69 Sensors and Arduino UNO. <https://doi.org/10.18280/ijdne.160409>

Wendell Berry (2015) Una voz fuerte para la agricultura local y la tierra

https://e360-yale-edu.translate.goog/features/interview_wendell_berry_a_strong_voice_for_local_farming_and_the_land?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=sg#~:text=For%20six%20decades%2C%20writer%20Wendell,remains%20hopeful%20for%20the%20future.

W. Hull et al. (2023). Dataset of temperature, humidity, and actuator states of an irrigation system with remote sensing in a greenhouse. ScienceDirect.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923007187>

Cirkit Designer. (n.d.). How to Use YL-69: Examples.
<https://docs.cirkitdesigner.com/component/983b91b0-610d-47cb-8b80-a246d92e3608/humidity-yl-69>

XI. ANEXOS

A. Marco referencial

Sololá es un municipio con un alto índice de agricultores, según el INE de Guatemala aproximadamente el 46% de la población económicamente activa (PEA) de este municipio se dedican a la agricultura, y Sololá se caracteriza por ser un municipio agrícola y aunque una gran parte de estas personas no cuentan con título académico orientado a esta área, la gran mayoría ha aprendido de sus ancestros y es así como el conocimiento pasa de generación en generación. Este método ha sido útil durante muchos años y ha encaminado a los agricultores a una producción en donde el porcentaje de pérdida se reduce considerablemente pero lamentablemente no es un secreto que el mundo está experimentando cambios climáticos que afectan directamente a la producción agrícola, específicamente hablaremos de la producción de tomate. En este contexto, estudios recientes como el proyecto ICC/Arauclicima (2022) han documentado cómo comunidades de Sololá están implementando medidas de adaptación al cambio climático, incluyendo sistemas de captación de agua, huertos verticales y cultivos alternativos. Además, el informe nacional del INSIVUMEH (2024) confirma un aumento sostenido de temperaturas y una disminución de precipitaciones, lo que agrava los riesgos para cultivos sensibles como el tomate, afectando directamente la seguridad alimentaria y la economía local. Sin embargo, en medio de estos desafíos, la innovación y la industrialización siguen siendo poco comunes dentro de la agricultura en Sololá. En tiempos donde la adaptación tecnológica es clave, acciones como la implementación de agricultura de precisión, biofertilizantes y sistemas automatizados de riego podrían no solo mejorar la producción, sino también contribuir significativamente a la reducción del uso de recursos naturales, fortaleciendo la resiliencia de las comunidades agrícolas.

A. Invernadero ubicado en aldea chumanzana Sololá, el invernadero tiene las siguientes dimensiones: 20 metros de largo por 6 de ancho

Figura 18. Visita a invernadero



Figura 19. Visita a invernadero



Figura 20. Visita a invernadero.



Figura 21. visita a invernadero



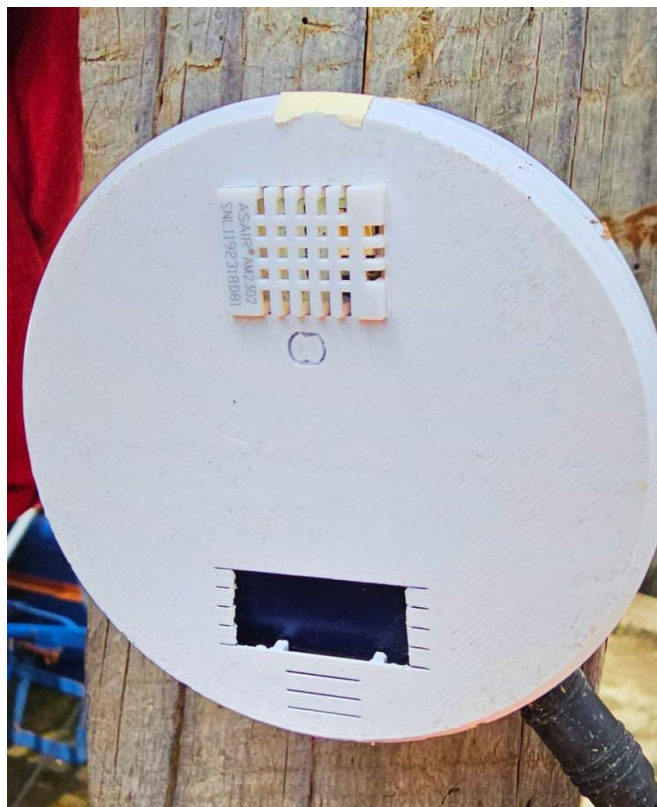
Figura 22. Visita a invernadero



Figura 23. Estación IoT implementado



Figura 24. estación IoT implementado



B. Desarrollo de Estación IoT

1. Sensor YL-69 (prototipo)

Figura 25. Sensor YL-69

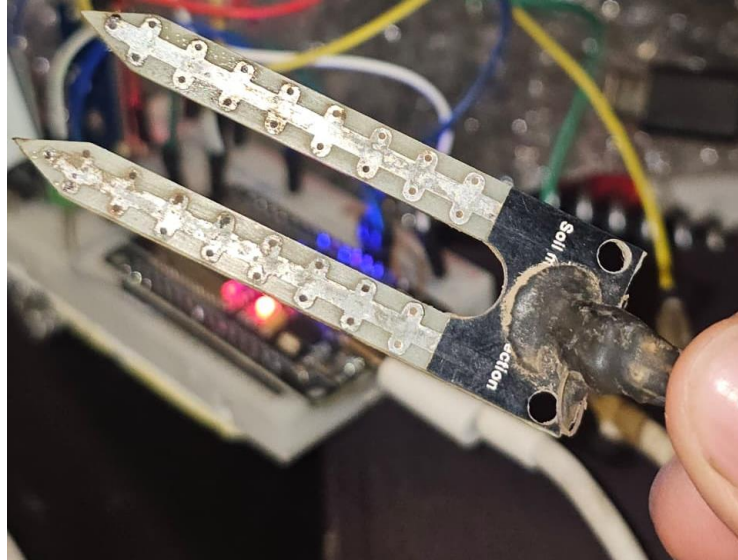


Figura 26. Sensor YL-69



2. Sensor DHT22 (prototipo)

Figura 27. Sensor DHT22

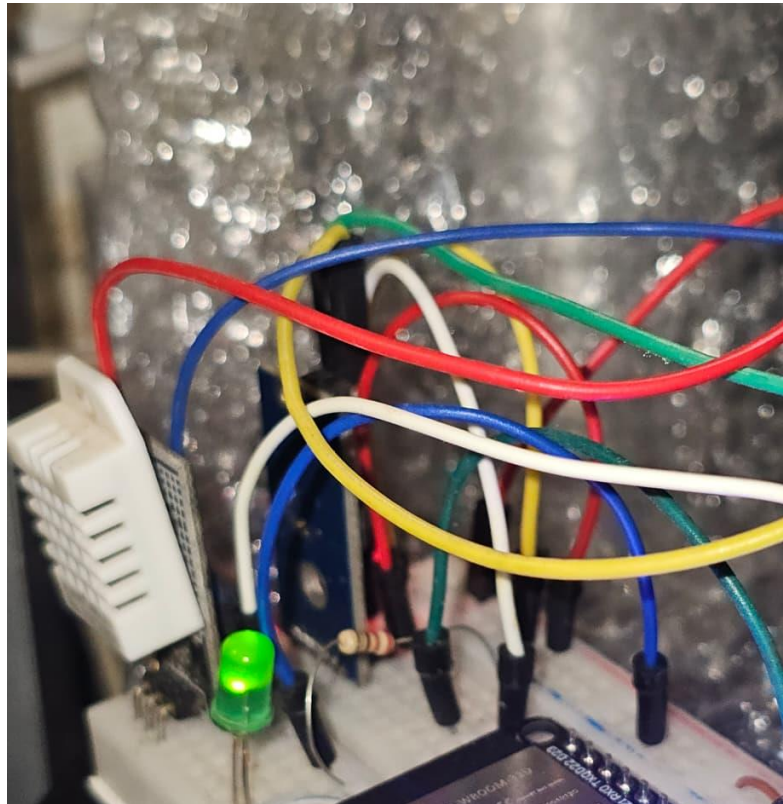
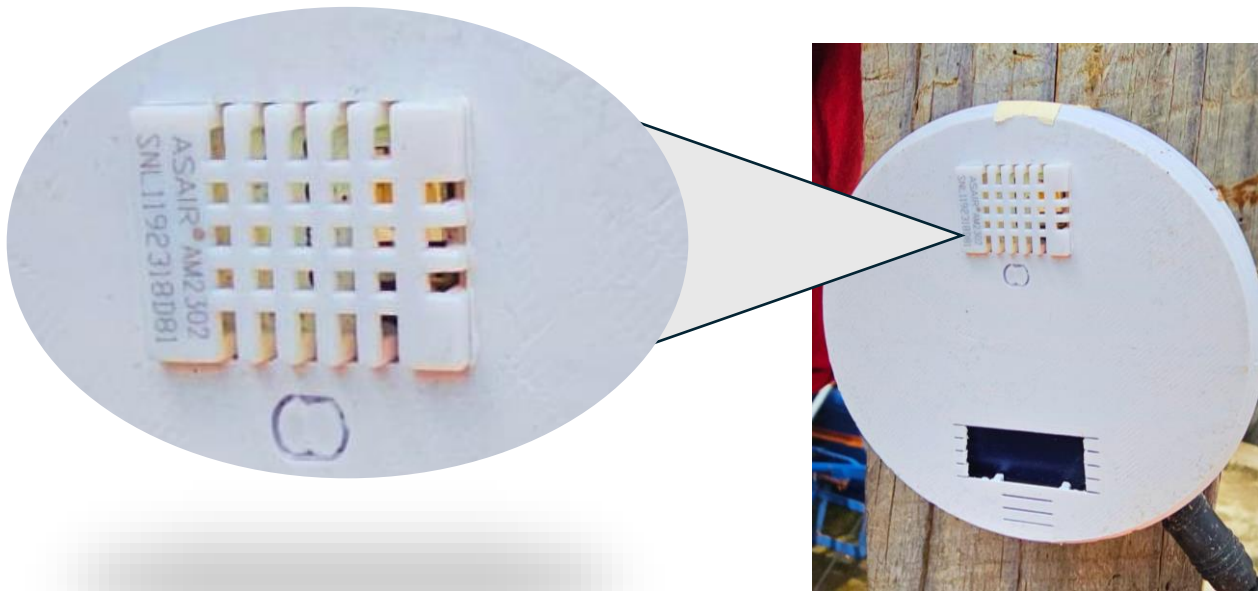
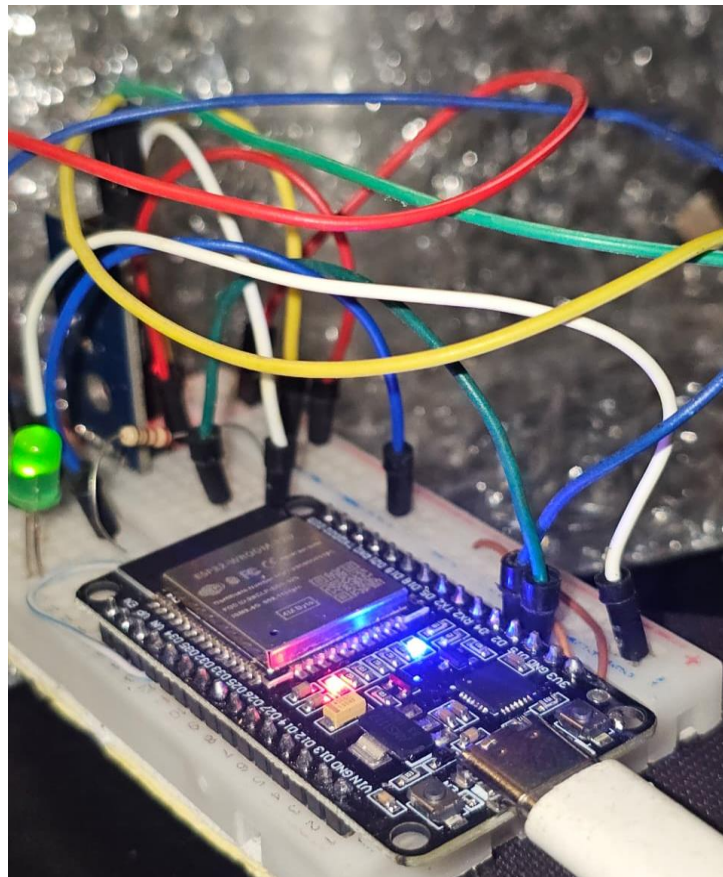


Figura 28. Sensor DHT implementado



3. Microcontrolador ESP32

Figura 29. Microcontrolador ESP32



4. Electroválvula

Figura 30. Electroválvula

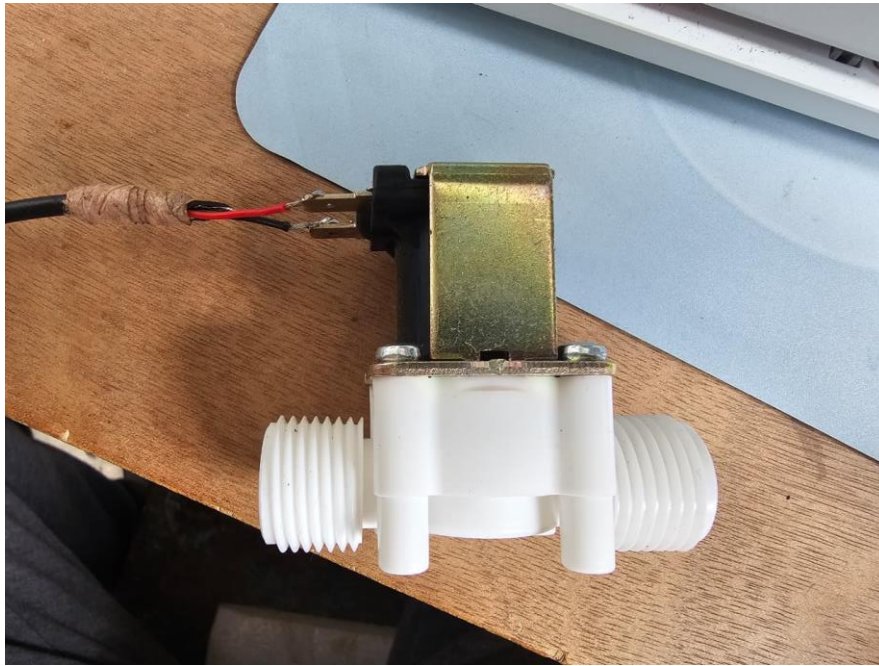
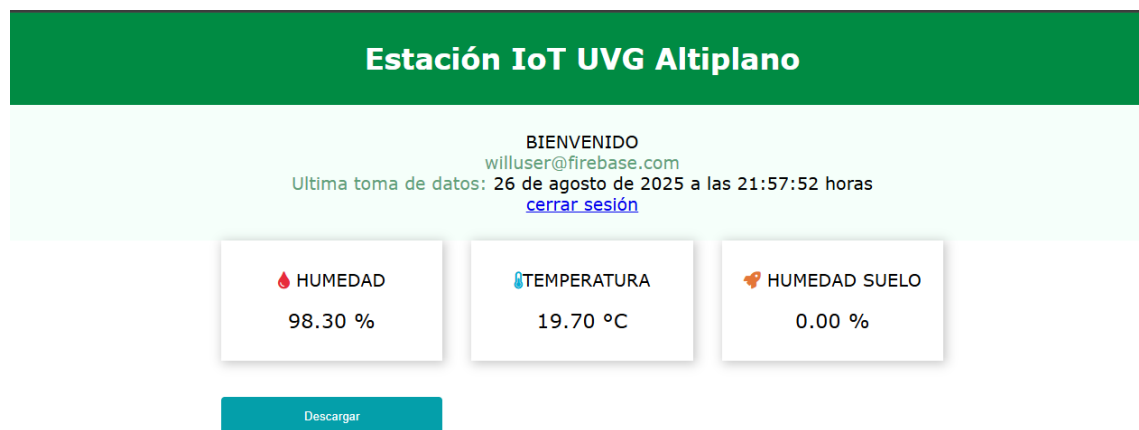


Figura 31. Electroválvula



C. Desarrollo de app-web: Versión PC (primera versión)

Figura 32. app-web primera versión



1. Versión Móvil (primera versión)

Figura 33. web-app primera versión



2. Versión Final:

Login:

Figura 34. login web-app



The login form features a green header with the title "Estación IoT UVG Altiplano". Below the header, there are two input fields: "Email" with the value "willuser@firebase.com" and "Password" with masked characters "*****". A green "Login" button is positioned below the password field.

Interfaz general:

Figura 35. vista general web-app



The dashboard has a green header with the title "Estación IoT UVG Altiplano". It contains several sections:

- A red warning banner: "⚠ Temperatura fuera del rango óptimo para la noche (15°C - 18°C)".
- A green welcome section: "BIENVENIDO", "willuser@firebase.com", "Ultima toma de datos: 2025-10-07 22:43:08", and a link "cerrar sesión".
- A yellow warning banner: "ⓘ Horario no recomendado de regar".
- Three data cards: "HUMEDAD" (77.90 %), "TEMPERATURA" (23.50 °C), and "HUMEDAD SUELO" (64 %).
- A "Descargar historial" button.
- A control panel with "Activar riego manual" (green), "Desactivar modo automático" (orange), "Limite humedad suelo (%):" (input field with value 50), and "Aceptar" (blue).

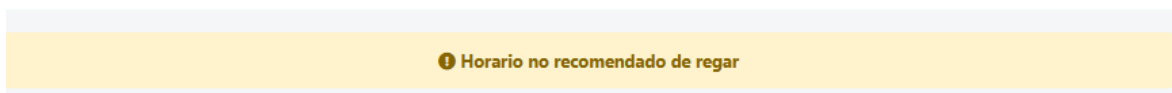
Funciones Específicas:

Advertencias definidas por el usuario:

Figura 36. Alertas al usuario



Figura 37. Alertas al usuario



Datos recopilados en tiempo real.

Figura 38. Datos recopilados



Información del usuario y fechas de la última fecha censada y el botón para cerrar sesión.

Figura 39. información de usuario y recopilación de datos



Botón de descarga: Este botón comienza la descarga del documento .xlsx (Excel) de todos los datos almacenados en la base de datos:

Figura 40. Botón de descarga de datos históricos

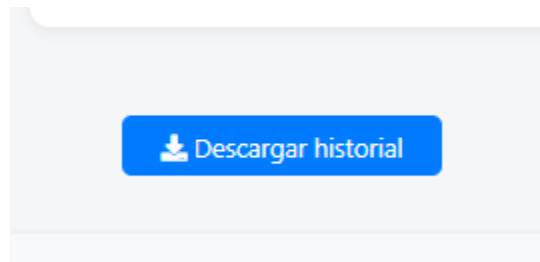
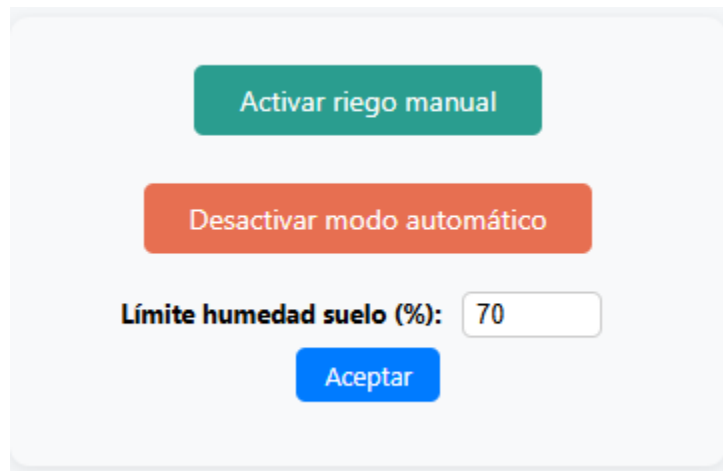


Figura 41. Control de accionamiento de electroválvula



El usuario establece el límite inferior de la humedad del suelo, acompañado del límite superior ya establecido de (80 %), es decir, cuando el sensor detecta menos humedad del límite establecido por el usuario y la función de riego automático está activo, el riego comenzará automáticamente y pasado el 50 % del rango establecido, automáticamente se cerrará la electroválvula. Ahora bien, cuando el usuario no tiene activo este modo, únicamente se le mostrará un mensaje de advertencia y de recomendación para activar el riego.

Figura 42. riego automático habilitado

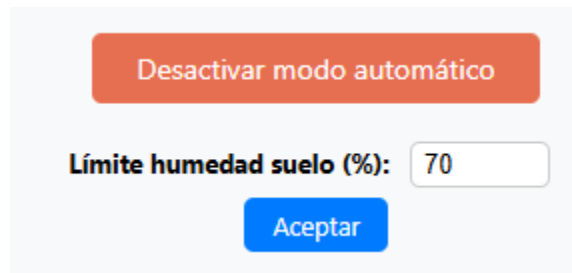
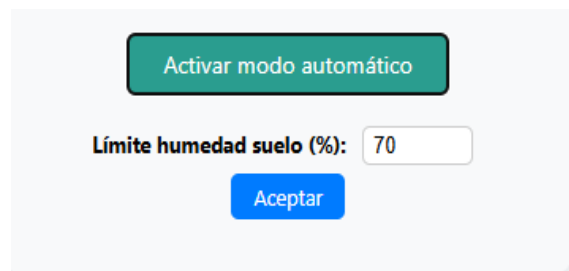


Figura 43. riego automático deshabilitado



Modo Manual: Si el usuario necesita accionar la electroválvula y comenzar el riego y tener control total del dispositivo, puede hacer uso del botón “Activar riego manual”, este botón abrirá paso al líquido y se desactivará hasta que el usuario la desactive manualmente.

Figura 44. riego manual deshabilitado

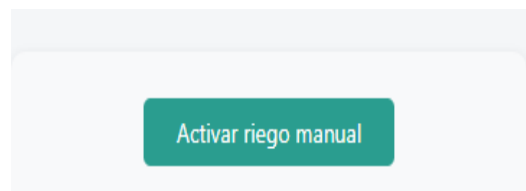
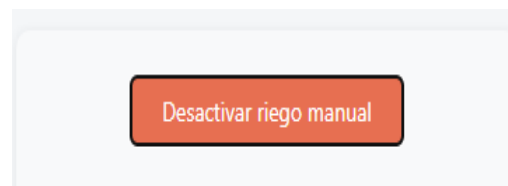


Figura 45. riego manual habilitado



Gráficas basadas en el historial (mensual).

Figura 46. Gráfica de humedad relativa

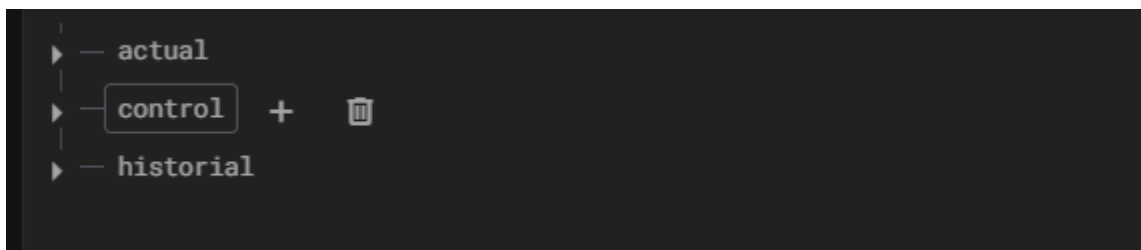


Figura 47. Grafica temperatura ambiental



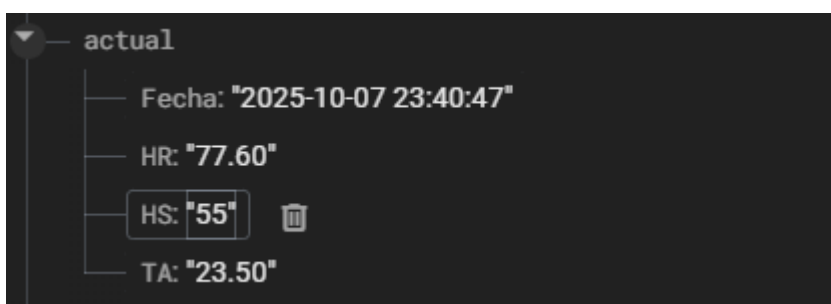
Backend:

Figura 49. Base de datos firebase



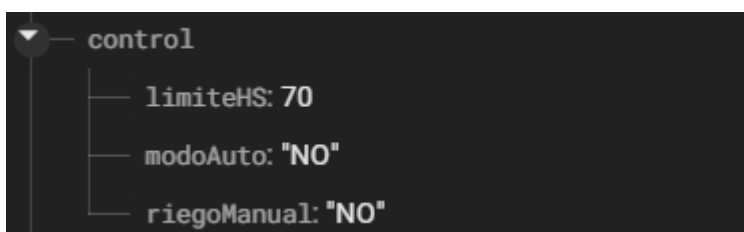
El nodo “Actual”, nos muestra los últimos datos tomados, es decir, los que el usuario verá en el sitio web, este dato se actualiza a cada 30 segundos o cada vez que se detecte un cambio muy notorio antes de ese tiempo.

Figura 50. nodo de datos en tiempo real



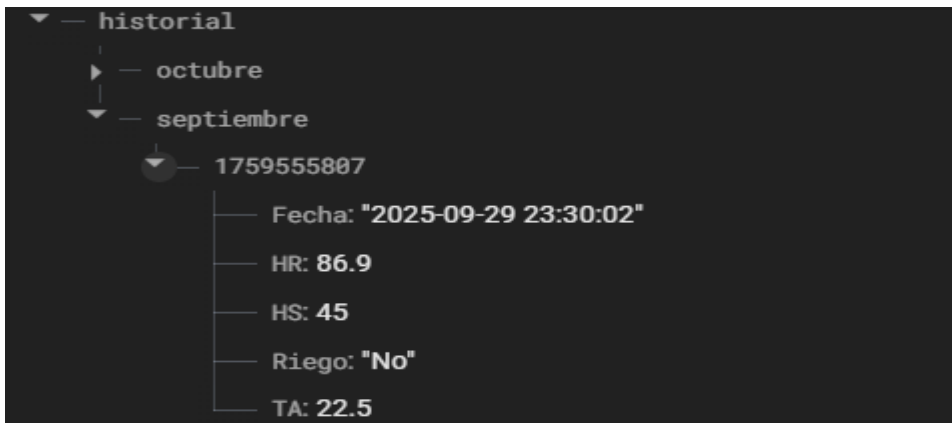
El nodo “control” es el encargado de almacenar los datos que accionan las funciones de riego automático o manual.

Figura 51. nodo para control de riego



El nodo “historial” almacena los datos obtenidos y los segmenta por mes, la toma de datos es a cada 10 minutos. Es decir que por hora se guardarán 6 registros y por día tendremos 144.

Figura 52. nodo para almacenar historial

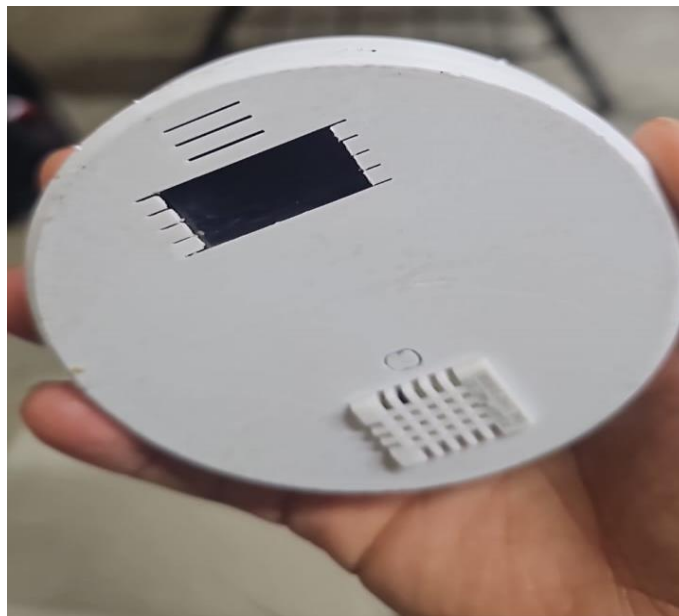


Al exportar los datos en formato xlsx (Excel), se nos presentarán los datos de humedad relativa, temperatura ambiental, humedad del suelo, la fecha con la hora que se tomó el dato, al tener estos datos de esta manera, se pueden realizar análisis exactos en herramientas como RapidMiner o powerBI o incluso en el mismo Excel, dependiendo del nivel de precisión, o capacidad económica para adquirir las licencias que tenga el usuario.

Figura 53. datos exportados

	A	B	C	D	E	F	G
1	Mes	Fecha	Temperatura Ambiente	Humedad Relativa	Humedad Suelo		
2	octubre	2025-10-03 23:30:08	22.50	86.90	9		
3	octubre	2025-10-03 23:40:08	22.50	87.40	8		
4	octubre	2025-10-03 23:50:08	22.80	85.40	17		
5	octubre	2025-10-04 00:00:08	23.10	84.10	15		
6	octubre	2025-10-04 00:10:08	23.20	83.60	14		
7	octubre	2025-10-04 00:20:08	23.30	83.30	13		
8	octubre	2025-10-04 06:52:06	18.90	98.20	14		
9	octubre	2025-10-04 07:02:06	20.20	93.30	13		
10	octubre	2025-10-04 07:12:06	20.60	89.40	11		
11	octubre	2025-10-04 07:22:06	20.90	90.10	11		

Figura 54. Versión final de la estación IOT



El dispositivo IoT, cuenta con una pantalla Oled de bajo consumo para poder mostrar el porcentaje de humedad del suelo cuando el riego esté activo.

Figura 55. pantalla OLED

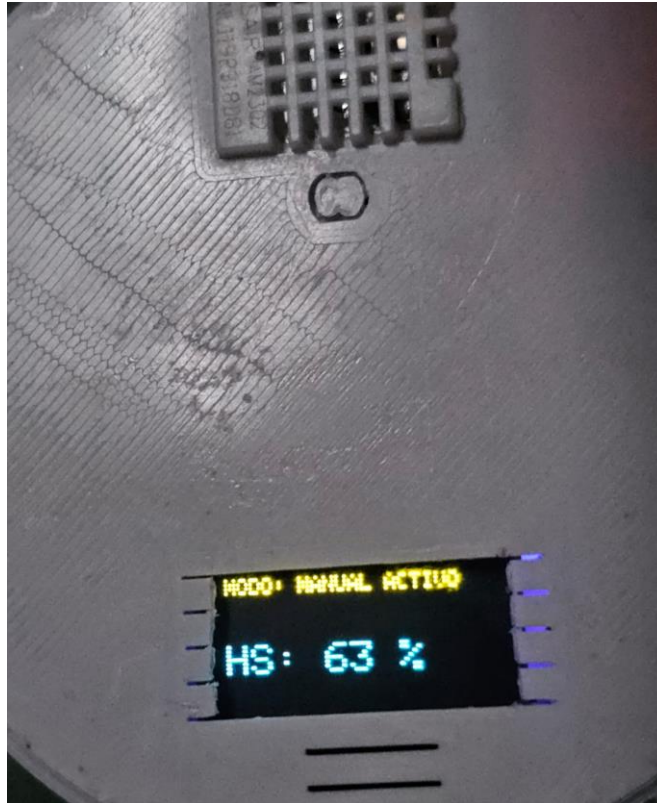


Figura 56. Riego por goteo



El dispositivo cuenta con un puerto tipo C para poder ser alimentado y sus complementos como la electroválvula, sensor de humedad, alimentación para la electroválvula (12v) serán

modulares, esto para poder ser transportado de mejor manera y darle una apariencia agradable estéticamente.

Figura 57. Conexiones



Figura 58. Conexiones



Código fuente del sistema IoT de riego automatizado (ESP32)

El siguiente código corresponde al programa implementado en el microcontrolador **ESP32**, desarrollado en el entorno **Arduino IDE**, encargado de gestionar los sensores DHT22 y YL-69, la electroválvula de riego mediante relé, y la comunicación con la base de datos **Firestore Realtime Database**.

Se incluyen las funciones de inicialización, lectura, control automático con histéresis y sincronización NTP.

Librerías y configuración inicial

Se incluyen las librerías que controlan la conexión Wi-Fi, el manejo de sensores y la interfaz gráfica OLED:

```
#include <WiFi.h>
#include "FirestoreESP32.h"
#include "time.h"
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
```

Declaración de pines y constantes

Define los pines del sensor de humedad, el DHT22 y el relé que activa la **electroválvula**:

```
#define DHTPIN 4
#define SOIL_MOISTURE_SENSOR_PIN 34
const int LED_PIN = 2; // Pin del relé (electroválvula)
```

También se establecen los valores de calibración del sensor de suelo y los intervalos de muestreo:

```
const int AIR_DRY_VALUE = 3400;
const int WATER_WET_VALUE = 1200;
const long HISTORIAL_INTERVALO = 600000; // 10 minutos
```

Conexión Wi-Fi y Firestore

Permite la comunicación con la base de datos en la nube:

```
#define WIFI_SSID "CCH"
#define WIFI_PASSWORD "starlink2025-"
#define FIREBASE_HOST "cch-estacion-default-rtdb.firebaseio.com"
#define FIREBASE_API_KEY "AIzaSy..."
```

El dispositivo se autentica con Firebase y sincroniza el tiempo mediante **NTP** (pool.ntp.org).

lectura de datos y control remoto

La función leerControlRemoto() consulta el nodo /**control** en Firebase para determinar:

- Si el riego manual está activado.
- Si el sistema está en modo automático.
- El valor umbral de humedad del suelo (limiteHS).

Lógica de control de riego

El corazón del sistema se encuentra en la función actualizarEstadoRiego(), donde se aplican las prioridades y la histéresis:

```
if (riegoManual) {
  riegoActivo = true;
} else if (modoAuto) {
  if (ultimoMoisturePercentage < limiteHS) {
    umbralApagado = limiteHS + ((80 - limiteHS) * 0.5);
    riegoActivo = true;
  } else if (ultimoMoisturePercentage >= umbralApagado) {
    riegoActivo = false;
    umbralApagado = 0;
  }
} else {if (riegoManual) {
  riegoActivo = true;
} else if (modoAuto) {
  if (ultimoMoisturePercentage < limiteHS) {
    umbralApagado = limiteHS + ((80 - limiteHS) * 0.5);
    riegoActivo = true;
  } else
```

```
riegoActivo = false;
}
```

Descripción:

- El modo **manual** tiene prioridad y activa el riego sin condiciones.
- En modo **automático**, el riego inicia cuando la humedad baja del umbral y se detiene al alcanzar el valor de **apagado** (histéresis).
- Si ningún modo está activo, el sistema mantiene la válvula cerrada.

Envío de datos a Firebase

Los datos actuales y el historial se almacenan en la nube: (Esto permite la visualización y análisis remoto de las condiciones del invernadero)

```
FirebaseJson dataActual;
dataActual.set("HR", ultimaH);
dataActual.set("TA", ultimaT);
dataActual.set("HS", ultimoMoisturePercentage);
dataActual.set("Fecha", formattedDateTime);
Firebase.set(firebaseData, NODO_ACTUAL, &dataActual);
```

Visualización en pantalla OLED

Durante el riego, se enciende la pantalla y muestra los valores principales (La pantalla se apaga automáticamente cuando el sistema no está regando para ahorrar energía):

```
display.print("HS: ");
display.print(ultimoMoisturePercentage);
display.println(" %");
```

Estructura del programa principal

En el setup() se inicializan sensores, pantalla, Wi-Fi y Firebase.

En el loop() se ejecutan los procesos periódicos:

- Lectura del nodo /control.

- Medición de sensores.
- Actualización de riego.
- Envío de datos a /actual y /historial.

Código fuente AppWeb:

El siguiente código corresponde al WebApp realizado con javascript, html y CSS.

Lectura en tiempo real de datos actuales: escucha cambios de /actual y actualiza tarjetas (HR, TA, HS) y la fecha “última toma”.

```
const actualRef = firebase.database().ref('actual');
actualRef.on('value', snapshot => {
  const v = snapshot.val();
  if (!v) return;
  hum.textContent = v.HR; temp.textContent = v.TA; pres.textContent = v.HS;
  dateDetails.textContent = v.Fecha || "";
  actualizarGraficasYAlertas(v.HR, v.TA, v.HS, v.Fecha);
});
```

Descarga de historial (Excel): recorre /historial/<mes>/<timestamp> y **genera un Excel** con columnas Mes, Fecha, TA, HR, HS.

```
document.getElementById("descargar-excel").addEventListener("click", () => {
  firebase.database().ref('historial').once('value', snap => {
    const rows = [];
    snap.forEach(mesSnap => {
      const mes = mesSnap.key;
      mesSnap.forEach(fechaSnap => {
        const val = fechaSnap.val();
        rows.push({ Mes: mes, Fecha: val.Fecha || fechaSnap.key,
          'Temperatura Ambiente': val.TA, 'Humedad Relativa': val.HR, 'Humedad Suelo': val.HS });
      });
    });
    const ws = XLSX.utils.json_to_sheet(rows);
    const wb = XLSX.utils.book_new();
    XLSX.utils.book_append_sheet(wb, ws, "Historial");
    XLSX.writeFile(wb, "historial_IoT.xlsx");
  });
});
```

```
});  
});
```

Formateo de fechas:

formatearFecha(fechaStr): convierte la clave YYYY-MM-DD-HH-mm-ss a una frase legible (día/mes/hora).

formatearFechaCorta(YYYY-MM-DD HH:MM:SS): para etiquetas de gráfico: DD/MM HH:MM:SS.

Gráfica por mes (on-demand): al clic en tarjeta de HR/TA/HS, abre el contenedor y grafica solo ese tipo para el mes (ej. “octubre”).

```
function graficarDatoMes(mes, tipo) {  
  const refMes = firebase.database().ref(`historial/${mes}`);  
  refMes.once('value', snapshot => {  
    const data = [];  
    let label = "";  
    snapshot.forEach(fechaSnap => {  
      const v = fechaSnap.val();  
      const f = formatearFechaCorta(v.Fecha || fechaSnap.key);  
      let valor = null;  
      if (tipo === 'humedad') { valor = Number(v.HR); label = 'Humedad Relativa (%)'; }  
      if (tipo === 'temperatura') { valor = Number(v.TA); label = 'Temperatura Ambiente (°C)'; }  
      if (tipo === 'suelo') { valor = Number(v.HS); label = 'Humedad Suelo (%)'; }  
      data.push({ fecha: f, valor });  
    });  
    // Destroy/Crear gráfico y dibujar línea  
  });  
}
```

Funcionamiento control remoto desde la web:

- Riego manual: botón #riego-btn cambia /control/riegoManual entre "SI"/"NO", con feedback visual.
- Modo automático: #btn-modo-auto alterna /control/modoAuto entre "ON"/"OFF".
- Umbral de humedad de suelo: #input-limiteHS + #btn-limiteHS validan 0–100 y escriben /control/limiteHS.

Relación con firmware: estos nodos son leídos por el ESP32 cada 5 s y aplican la lógica de riego (prioridades + histéresis).