

Diseño de un Sistema Automatizado para mejorar la Producción y Calidad de Plantas de Cilantro
en Huertos Urbanos

Juan Diego Palencia Pedrozo y Jhonatan Oswaldo Franco Guerrón

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Electrónicos

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

M. Sc. en Potencia Eléctrica

Codirector

Nelson Facundo Rodriguez López

Dr. en Fisiología vegetal

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este logro con todo mi corazón a mis padres, Yudis Pedrozo y Miguel Palencia, quienes, con su amor incondicional y apoyo permanente, han sido mi mayor inspiración para seguir adelante a pesar de las situaciones de salud complicadas que ambos enfrentaron, nunca dejaron de brindarme su fuerza y ejemplo, impulsándome a alcanzar este gran paso en mi vida. A mis hermanos, Luis Palencia y Ana María Palencia, gracias por su apoyo sincero y por estar presentes en cada uno de los desafíos que pasamos juntos como familia. Y finalmente, a mi compañero de trabajo de grado, Jhonatan Franco, gracias por tu respaldo en los momentos clave de este proceso. Tu compromiso, apoyo y disposición fueron esenciales para que este proyecto pudiera llegar a feliz término.

Juan Diego Palencia Pedrozo

Primero quiero agradecer a Dios por estar en mi camino, guiarme, sostenerme y nunca desampararme. Dedico este gran logro a mi padre Oswaldo Franco y madre Andrea Guerrón que siempre estuvieron conmigo dándome su apoyo y amor incondicional, que me dieron empujones y ánimo cuando sentía que todo iba cuesta arriba. También dedico este logro a mis hermanos y a mi tío que también estuvieron pendientes de mí y cada uno de mis pasos. Especialmente a mis abuelitos que junto a mis padres son y serán todo para mí, mi motivación y mis ganas de salir adelante. Y finalmente, a mi compañero Juan Palencia que atravesamos juntos toda la carrera y estoy muy agradecido por haber coincidido con una gran persona como lo eres tu. Te dedico mi título abuelito, que sé que estarías muy orgulloso de mí.

Jhonatan Oswaldo Franco Guerrón

Tabla de Contenido

Lista de Apéndices	7
Introducción	10
1 Objetivos	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos	11
2 Marco Teórico	12
2.1 Cilantro	12
2.2 Agricultura de precisión en el contexto de la agricultura urbana	12
2.3 Propiedades físicas, químicas y biológicas	13
2.4 Variables ambientales y sensores	13
2.5 Prácticas de riego	13
2.6 Placa de Circuito Impreso (PCB)	14
2.7 Registrador HOBO	14
2.7.1 Relación aproximada PAR a Lux	14
2.8 Internet de las Cosas (IoT) en agricultura	15
2.9 Calibración y validación de sensores	15
3 Metodología	17
3.1 Plan de campo: Disposición del área de cultivo y mapeo del sistema.	17
3.1.1 Selección del invernadero UIS, criterios y restricciones	17
3.1.2 Diseño del sistema de riego, camas de cultivo y ubicación de SAI	17
3.2 Preparación del sustrato y estudio de suelo	18
3.2.1 Preparación del sustrato	18
3.2.2 Estudio del suelo	19
3.3 Arquitectura de Hardware & Software	19
3.3.1 Arquitectura de Hardware	19
3.3.2 Arquitectura de Software	21

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CULTIVO DE CILANTRO	4
3.4 Diseño e implementación de la PCB y encapsulado	22
3.5 Sistema de riego	23
3.6 Calibración de sensores	24
3.6.1 Calibración de sensores de T, HR e IL	24
3.6.2 Calibración de sensores de HRS 1 & 2:	25
3.7 Implementación final en campo	26
3.7.1 Siembra del cultivo	27
3.7.2 Implementación del App móvil	27
4 Análisis y resultados	29
4.1 Resultados de calibración	29
4.2 Evolución del cultivo y desempeño de SAI en Campo	31
4.2.1 Evolución del cultivo	31
4.2.2 Desempeño en Campo: Control de riego.	32
4.3 Funcionamiento IoT y plataforma de visualización	33
4.4 Comparación con estación HOBO	34
4.5 Comparación de la producción de cilantro en las camas de cultivo correspondientes	37
4.6 Comparación experimental y sensorial del cilantro producido por SAI	38
4.7 Validación de la solución propuesta	40
5 Conclusiones	41
6 Recomendaciones	42
Referencias	43

Lista de Figuras

1	Espacio destinado al desarrollo del proyecto	17
2	Esquema del sistema de riego y distribución de espacio	18
3	Camas de cultivo montadas y llenas de sustrato preparado	19
4	Esquemático preliminar	20
5	Mapa mental de la arquitectura de software	22
6	Esquemático principal	22
7	Diseño 3D - Vista superior e inferior	23
8	Encapsulado y montaje de SAI	23
9	Sistema de Riego 3D & Sistema de Riego Real	24
10	Implementación Final	27
11	Proceso de arado del sustrato y siembra	27
12	HOBO vs SAI (T, HR E IL)	29
13	Gráfico de HRS normalizado HOBO vs SAI (Suelo 1 & 2)	30
14	Proceso de crecimiento del cultivo hasta la cosecha	32
15	Gráfico de activación de válvulas por semana	33
16	Conexión IoT: (a) Adafruit IO, (b) app móvil y (c) notificación por correo.	34
17	Comparación de SAI vs HOBO de HR & T en un periodo de 3 días	36
18	Comparación de IL de SAI vs HOBO por un periodo de 3 días	36
19	Comparación de HRS 1 & 2 de SAI vs HOBO por un periodo de 3 días	37
20	Cultivo informal de cilantro	39

Lista de Tablas

1	Componentes de la arquitectura de hardware.	21
2	Resumen de T por franjas de 4 horas entre sensores SAI y HOBO.	25
3	Resumen de HR e IL por franjas de 6 horas para SAI y HOBO.	25
4	Relación entre volumen de agua aplicado y valores ADC y VWC promedio en cada cama.	26
5	Resumen de ajustes y errores de calibración	30
6	Modelos de calibración HRS para suelos 1 & 2 con sus métricas de error.	31
7	Comportamiento de la HRS durante el periodo de cultivo	33
8	Errores de calibración por variable	35
9	Promedios de longitudes físicas del cilantro por cama en [cm]	37
10	Mediciones de hojas y raíces utilizadas para el cálculo de la biomasa total y biomasa por individuo en [g]	38
11	Cumplimiento de criterios del problema planteado	40

Lista de Apéndices

Apéndice A Códigos en Google Colab y Repositorio en GitHub	45
Apéndice B Pruebas de funcionamiento, tablas y evidencias audiovisuales	46
Apéndice C Estudio del suelo	47

Resumen

Título: Diseño de un Sistema Automatizado para mejorar la Producción y Calidad de Plantas de Cilantro en Huertos Urbanos ¹

Autor: Juan Diego Palencia Pedrozo y Jhonatan Oswaldo Franco Guerrón ²

Palabras clave: Internet de las Cosas, Agricultura de Precisión, Riego Automatizado, Humedad del Suelo, Sensores, Calibración, Cilantro.

El presente trabajo de grado describe el diseño, implementación y validación de un Sistema Agrícola IoT (SAI) orientado al monitoreo y control automatizado del riego en el cultivo de cilantro en huertos urbanos. El sistema integró sensores de temperatura, humedad relativa, luminosidad y humedad del sustrato, vinculados a un microcontrolador ESP32 con comunicación en la nube y control automático de electroválvulas por umbral de humedad relativa del suelo. Para la gestión y visualización remota de datos, se implementó la plataforma Adafruit IO en la nube, y como interfaz de control móvil se empleó la aplicación Blynk. Durante la validación, se llevaron a cabo procesos de calibración frente a una referencia (estación HOBO), obteniendo errores dentro de márgenes aceptables para la toma de decisiones agronómicas en el campo. Los resultados demostraron que el prototipo permitió mantener la humedad del sustrato en una región operativa estable, reduciendo la frecuencia de sobre y subriego, mejorando el aprovechamiento hídrico y aportando trazabilidad de datos mediante registros digitales. Adicionalmente, la arquitectura modular del sistema mostró potencial para ser replicada en cultivos inteligentes en diferentes contextos de agricultura urbana y agricultura de precisión. Como limitación, se identificó que la validación se realizó únicamente en un sitio y con una mezcla de sustrato específica, por lo que se recomienda su réplica en otras condiciones y temporadas.

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Jaime Guillermo Barreo Pérez, Magíster en potencia eléctrica. Codirector Nelson Facundo Rodríguez López Dr en Biología.

Abstract

Title: Design of an Automated System to Improve the Production and Quality of Cilantro Plants in Urban Gardens ¹

Author: Juan Diego Palencia Pedrozo y Jhonatan Oswaldo Franco Guerrón ²

Keywords: Internet of Things, Precision Agriculture, Automated Irrigation, Soil Moisture, Sensors, Calibration, Cilantro.

The present thesis describes the design, implementation, and validation of an IoT Agricultural System (SAI) aimed at automated irrigation monitoring and control in cilantro cultivation within urban gardens. The system integrated sensors for temperature, relative humidity, luminosity, and substrate moisture, connected to an ESP32 microcontroller with cloud communication and automatic control of solenoid valves based on soil moisture thresholds. During validation, calibration processes were carried out against a reference (HOBO station), obtaining errors within acceptable margins for agronomic decision-making in the field. The results demonstrated that the prototype maintained substrate moisture within a stable operational range, reducing the frequency of over- and under-irrigation, improving water use efficiency, and providing data traceability through digital records. Additionally, the modular system architecture showed potential for replication in short-cycle crops and different urban agriculture contexts. As a limitation, validation was conducted at a single site and with a specific substrate mixture; therefore, replication under other conditions and seasons is recommended.

¹Degree Project

²Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Master in Electrical Power and Nelson Facundo Rodríguez López Doctor of Biology.

Introducción

La agricultura urbana se ha consolidado como una alternativa confiable para producir alimentos frescos en espacios reducidos como terrazas, balcones y huertas comunitarias. En este contexto, el cilantro destaca por su relevancia gastronómica y nutricional, siendo un ingrediente habitual en la cocina colombiana. No obstante, la calidad y la producción pueden verse comprometidas por factores ambientales y de manejo, especialmente cuando falta el monitoreo sistemático de variables fisiológicas y ambientales clave como la humedad del sustrato y la humedad relativa, que inciden directamente en sanidad y rendimiento en hortalizas de hoja ((10)). Adicionalmente, los riesgos fitosanitarios y microbiológicos aumentan bajo condiciones de alta humedad y manejo deficiente, con reportes de patógenos fúngicos y bacterianos que comprometen rendimiento y calidad, destacándose la incidencia de *Alternaria* y otras enfermedades que requieren manejo oportuno ((7; 8)). Estos factores pueden promover la aparición de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA), como la infección por *Escherichia coli* O157:H7, con implicaciones importantes en la salud pública ((5; 14)).

Este proyecto propone el diseño e implementación de un sistema automatizado para mejorar la producción y calidad del cilantro en huertos urbanos. La solución integra sensores para monitorear variables ambientales como: intensidad lumínica (IL), humedad relativa del suelo (HRS), temperatura (T) y humedad relativa ambiente (HR); además controla automáticamente el riego mediante electroválvulas. También se establece comunicación WiFi y registro en una nube para la supervisión remota. El desarrollo se realiza en colaboración con el Laboratorio de Ecofisiología Vegetal y Ecosistemas Terrestres (GIEFIVET) y el Grupo de Investigación de control, electrónica, modelado y simulación (CEMOS) de la Universidad Industrial de Santander.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo piloto, que permita mejorar la producción y calidad de plantas de Cilantro en huertos urbanos.

1.2. Objetivos Específicos

Implementar un sistema de monitoreo automatizado para registrar y analizar parámetros críticos del cultivo de cilantro, como temperatura ambiente, luminosidad y humedad relativa del suelo.

Desarrollar un sistema de comunicación inalámbrica que facilite la transferencia de datos para visualizar y analizar la información recopilada de manera eficiente y accesible.

Desarrollar un sistema de control de apertura y cierre de válvulas para el riego con agua pura, controlando tanto la sequedad como el exceso de humedad en las plantas.

Crear una base de datos que registre y almacene los datos recopilados de las mediciones durante el periodo del cultivo, con el fin de comparar la calidad del producto final obtenido con estándares de calidad establecidos en el mercado.

2. Marco Teórico

En esta sección se hablará acerca de los conceptos esenciales que permitirán una mejor comprensión del proyecto de investigación, ayudando a interpretar la metodología y el respectivo análisis de resultados.

2.1. Cilantro

El cilantro (*Coriandrum sativum* L.) es una planta herbácea anual de la familia Apiaceae, cultivada en gran parte del mundo por sus hojas frescas y semillas de valor culinario, farmacéutico y cosmético. Su desarrollo óptimo se da en rangos de 20–30 °C, con alta intensidad lumínica, suelos profundos, fértiles y bien drenados, evitando encharcamientos y excesos de humedad relativa que favorecen enfermedades. Requiere al menos un 80% de humedad disponible en el suelo, y bajo un 73% de sombra crece más lento, mientras que con mayor luz acelera su desarrollo ((10)). En cultivos orientados a follaje fresco, la cosecha puede iniciarse entre los 35–45 días, cuando las plantas alcanzan cerca de 25 cm de altura, y extenderse hasta los 60–72 días antes de la floración para preservar la calidad del follaje. En ambientes controlados, la regulación de temperatura, luz y humedad relativa permite reducir el espigado y prolongar la ventana de cosecha con mayor uniformidad ((10; 8)). Adicionalmente, la integración de sensores para automatizar riego y fertilización (p. ej; HRS, Conductividad eléctrica, T y HR) humedad relativa), optimiza el uso de agua y nutrientes, reduce el estrés del cultivo y mejora la consistencia productiva en horticultura urbana ((12)).

2.2. Agricultura de precisión en el contexto de la agricultura urbana

La agricultura de precisión es un enfoque que ajusta el manejo de los cultivos según sus condiciones específicas mediante sensores y sistemas de control, optimizando recursos y mejorando la sostenibilidad. Por su parte, la agricultura urbana se practica en ciudades, en espacios como terrazas, azoteas o huertos comunitarios, con el fin de acercar la producción al consumo. Al combinarse, ambos enfoques permiten un manejo eficiente de variables como riego, temperatura y humedad en cultivos de ciclo corto como el cilantro. En Colombia, la agricultura de precisión ya se implementa en cultivos como el aguacate Hass, donde empresas han incorporado sensores

IoT, drones y estaciones meteorológicas automáticas para optimizar riego, fertilización y sanidad vegetal ((1)).

2.3. Propiedades físicas, químicas y biológicas

El sustrato agrícola constituye el medio donde se desarrollan las plantas, y su desempeño depende de propiedades físicas, químicas y biológicas. En el plano físico, la textura y la capacidad de retención de agua son determinantes: Suelos arenosos favorecen el drenaje y la aireación, pero requieren enmiendas o materia orgánica para mejorar la disponibilidad hídrica. Desde el punto de vista químico y biológico, la materia orgánica incrementa la fertilidad, facilita la disponibilidad de nutrientes y sostiene comunidades microbianas que promueven la mineralización y refuerzan la estabilidad estructural del suelo ((11)). Un aspecto adicional es el efecto borde, que se refiere a las variaciones ambientales en los límites del cultivo. Factores como radiación, temperatura y humedad suelen diferir respecto al interior, generando microclimas que alteran el crecimiento y la fisiología de las plantas. Este fenómeno debe considerarse en el diseño experimental y en la interpretación de resultados, dado que puede introducir sesgos en el análisis (Golubkina et al.).

2.4. Variables ambientales y sensores

El rendimiento del cilantro depende de factores como la temperatura (T) y la humedad relativa (HR), que regulan la transpiración y el metabolismo; la intensidad lumínica (IL) es esencial para la fotosíntesis; y la humedad relativa del suelo (HRS), que determina la disponibilidad de agua. Estas variables se monitorean mediante sensores ((10)). Los sensores convierten magnitudes físicas en señales eléctricas interpretables. La T y HR se miden con sensores como el DHT11, la IL se cuantifica con sensores como el BH1750 y la HRS puede medirse mediante sensores resistivos o capacitivos. La hoja de datos de estos sensores se encuentra en los anexos (Ver Anexo B).

2.5. Prácticas de riego

Un manejo inadecuado del agua puede generar serias afectaciones en el cultivo: el encharcamiento y la sobresaturación del suelo favorecen enfermedades fúngicas como la podredumbre radicular (*Phytophthora* spp., *Pythium* spp.) y la proliferación de hongos foliares, mientras que

la sequía prolongada ocasiona estrés hídrico, marchitez y disminución en la fotosíntesis (2). Los sistemas de riego automatizado, a diferencia del riego manual, aplican agua con base en umbrales medidos (VWC o HR) o en ventanas horarias, reduciendo riesgos de sobre- o sub-riego. Además, optimizan la lámina aplicada en cada etapa y ofrecen ventajas como telemetría y trazabilidad del proceso.

2.6. Placa de Circuito Impreso (PCB)

Las placas de circuito impreso (PCB) son el soporte esencial de los sistemas electrónicos, al permitir fijar e interconectar los componentes de manera confiable. Se fabrican en materiales aislantes como fibra de vidrio (FR4), resinas epóxicas o fenólicas, recubiertos con cobre donde se definen las pistas mediante impresión y grabado químico. Su diseño considera parámetros como ancho de pista, separación, planos de tierra y disipación térmica, pudiendo ser de una o varias capas según la complejidad del circuito.

2.7. Registrador HOBO

El HOBO es un registrador de datos (data logger) desarrollado por Onset Computer Corporation, empleado para la medición continua de variables ambientales como T (°C), radiación solar (PAR $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), HR (%) y HRS (VWC) además de otras variables. Su uso en agricultura es clave por la precisión y estabilidad que ofrece en la toma de datos. Esto permite el seguimiento de condiciones de cultivo, como la calibración de sensores de bajo costo. De esta forma, HOBO aporta un soporte técnico esencial para validar la exactitud de sistemas de monitoreo y a la toma de decisiones en el manejo del riego y del microclima agrícola.

2.7.1. Relación aproximada PAR a Lux

En agricultura, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400–700 nm) es clave para la fotosíntesis, pero muchos sensores económicos reportan en lux, unidad asociada a la percepción humana de la luz. Para estimar PAR a partir de lux se aplican factores de corrección basados en las características espectrales de la fuente de luz, como los propuestos por Waveform Lighting ((Lighting)). Esto permite usar sensores accesibles para obtener una estimación confiable de la

radiación útil en el crecimiento vegetal.

$$1 \text{ PPF}D (\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}) \approx 54 \text{ lux}$$

2.8. Internet de las Cosas (IoT) en agricultura

La (IoT) conecta dispositivos capaces de medir y transmitir información en tiempo real, lo que en agricultura permite el monitoreo de variables ambientales y automatizar procesos como el riego, optimizando recursos y mejorando la eficiencia productiva. Dos herramientas importantes a tener en cuenta para que se pueda ejecutar un sistema IoT en la agricultura son el microcontrolador y los protocolos y plataformas de gestión:

- **Protocolos y plataformas de gestión :**

Los protocolos de comunicación y las plataformas en la nube constituyen la base de los sistemas IoT. El protocolo WiFi permite la conectividad inalámbrica de dispositivos a redes locales y globales, mientras que MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) se emplea como un estándar ligero y eficiente para la transmisión de datos en escenarios de monitoreo. De forma complementaria, las plataformas de gestión en la nube, como Adafruit IO, ofrecen servicios de almacenamiento, visualización y control remoto, permitiendo la integración entre dispositivos físicos y aplicaciones de supervisión.

- **Microcontrolador ESP32 :**

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo que incorpora conectividad WiFi y Bluetooth, junto con un procesador de alto rendimiento y múltiples interfaces. También funciona como nodo central de IoT, encargado de adquirir datos de sensores, enviarlos a la nube y controlar las electroválvulas de riego de manera automática y remota.

2.9. Calibración y validación de sensores

Los sensores de bajo costo presentan sesgos y no linealidades, por lo que se calibran frente a referencias confiables (como lo es el registrador HOBBO), mediante ajustes polinomiales: un polinomio de primer grado equivale al ajuste lineal, mientras que grados superiores corrigen comportamientos no lineales. Estos ajustes permiten transformar las lecturas del sensor en valores más

precisos y comparables con la referencia. La validación se realiza dividiendo los datos en entrenamiento y prueba y cuantificando el error con métricas estándar: MAE (error medio absoluto), RMSE (raíz del error cuadrático medio), MAPE (porcentaje absoluto medio) y R^2 (coeficiente de determinación).

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

El RMSE penaliza con mayor peso los errores grandes (Ecuación 2):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

El MAPE expresa el error relativo en porcentaje (Ecuación 3):

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (5)$$

Finalmente, el R^2 indica la proporción de varianza explicada por el modelo (Ecuación 4):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Se recomienda realizar la calibración y validación en un entorno de programación como Python, eligiendo el modelo más simple que cumpla con los umbrales de precisión y documentando las condiciones para asegurar reproducibilidad.

3. Metodología

La metodología propuesta en este trabajo se organizó en una serie de etapas diseñadas para dar cumplimiento a los objetivos planteados. Dichas etapas abarcan desde la adecuación del área de cultivo y la preparación del sustrato, hasta el diseño, montaje e integración del sistema automatizado de monitoreo y riego. Cada fase se definió con base en criterios técnicos y agronómicos, lo que permitió que el Sistema Agrícola IoT (SAI) avanzara de su diseño inicial a la implementación práctica en el invernadero. Así, se asegura que las decisiones metodológicas se reflejen en los resultados del prototipo.

3.1. Plan de campo: Disposición del área de cultivo y mapeo del sistema.

3.1.1. Selección del invernadero UIS, criterios y restricciones

Para la fase inicial del proyecto se definió el espacio destinado para el cultivo el laboratorio de ecofisiología vegetal y ecosistemas terrestres de la UIS. La selección de este lugar respondió a criterios de disponibilidad, condiciones controladas y adecuación del entorno para el desarrollo experimental, considerando además las restricciones de espacio y acceso a los recursos de riego, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1:

Espacio destinado al desarrollo del proyecto



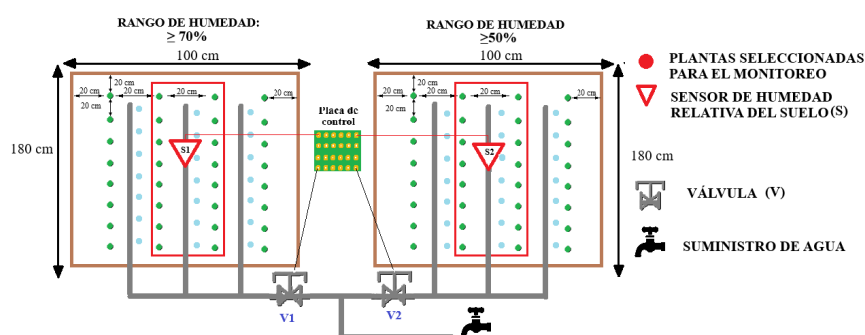
3.1.2. Diseño del sistema de riego, camas de cultivo y ubicación de SAI

En la Figura 2 se aprecia el diseño del sistema de cultivo. Con el fin de garantizar un área de cultivo homogénea y replicable, se construyeron las camas de cultivo de $100 \times 180 \times$

30 cm, recubiertas con plástico calibre 6. Se consideraron plantas competentes las del centro por su menor exposición a efectos de borde. La disposición del sistema contempló también el riego distribuido a cada cama, tomando como suministro una llave que permite un servicio de agua ininterrumpido, además de la ubicación estratégica de los sensores y del nodo central de SAI. El nodo central se instaló entre las dos camas de cultivo, con sensores de T, HR e IL en la parte superior y de humedad del suelo en el centro de cada cama de cultivo. Los umbrales de activación se definieron el 70% para la cama 1 y 50% para la cama 2, con base en la revisión bibliográfica que se encuentra en la sección 2.1 y también bajo las indicaciones de los expertos de GIEFIVET, para efectos de las pruebas experimentales. Esta elección permitió evaluar el desempeño del sistema bajo dos condiciones de manejo diferenciadas, teniendo en cuenta que el cilantro se adapta también a rangos de humedad del suelo entre 40%–50%, considerados adecuados para su desarrollo (6). De esta forma, los umbrales seleccionados permiten validar tanto la respuesta del cultivo como la efectividad del control automático de riego para la eficiencia del agua.

Figura 2:

Esquema del sistema de riego y distribución de espacio



3.2. Preparación del sustrato y estudio de suelo

3.2.1. Preparación del sustrato

El suelo fue tamizado manualmente para eliminar partículas y residuos, y luego se formuló una mezcla 3:1:1 de sustrato tamizado, tierra negra y compost Abimgra (gallinaza). Esta combinación mejoró la estructura y retención de agua, aportó nutrientes y favoreció la actividad microbiana, generando un sustrato balanceado para el cultivo ((3)). La mezcla se depositó en las

camas de cultivo descritas en la figura 3.

Figura 3:

Camas de cultivo montadas y llenas de sustrato preparado



3.2.2. Estudio del suelo

Para evaluar la calidad del sustrato final se realizó un análisis de 500 g en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales (LQCI) de la Universidad Industrial de Santander. El análisis químico mostró pH neutro, buena fertilidad y adecuada retención de agua, con deficiencia en N, K y Zn, lo que motivó enmiendas correctivas (Ver Apéndice C).

3.3. Arquitectura de Hardware & Software

El diseño de SAI integró módulos electrónicos, controladores y una plataforma de supervisión para asegurar la adquisición de datos y el accionamiento de actuadores. La arquitectura se dividió en dos dimensiones: *hardware*, para la disposición física de los componentes, y *software*, para la gestión de datos y eventos.

3.3.1. Arquitectura de Hardware

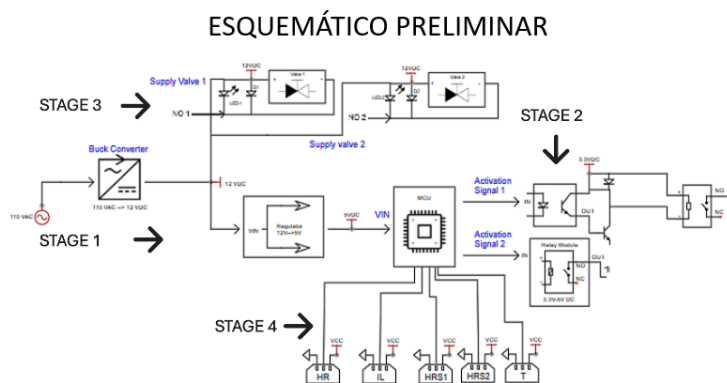
Para la arquitectura de hardware se plantearon cuatro etapas principales con el fin de cumplir los requisitos de alimentación, control, protección y medición:

- **Etapas 1: Alimentación y regulación.** Alimentación de 12 V para la electroválvula y regulación a 5 V para alimentar sensores y microcontrolador adicionalmente la integración de fusibles y filtros.

- **Etapa 2: Control de válvulas.** Control de válvulas mediante optoacoplador y relé, además de un módulo de relé comercial de 5 V. El optoacoplador se utilizó para aislar la lógica de control (3.3/5 V) de la etapa de potencia (12 V) de las electroválvulas, evitando que ruidos, transitorios o interferencias electromagnéticas debido a las camas de cultivo que afecten al microcontrolador. También se implementó un módulo relé de 5 V en la etapa de conmutación para controlar la válvula 2 y ver como funcionaban ambos circuitos.
- **Etapa 3: Señalización y protección.** Señalización con LEDs de estado y protección con diodos flyback.
- **Etapa 4: Medición.** Integración de sensores de T, HR, IL y HRS que tengan compatibilidad con el microcontrolador.
- **Arquitectura esperada.** El esquemático preliminar (figura 4) muestra la integración de todas las etapas y sirvió de base para la selección de componentes y el montaje en protoboard. El esquemático de cada etapa se puede ver en anexos (Ver Anexo B).

Figura 4:

Esquemático preliminar



- **Selección de componentes:** En la Tabla 1 se listan los componentes seleccionados para cada una de las categorías correspondientes. La prueba de montaje con los componentes se puede ver en anexos (Ver Anexo B).

Tabla 1:

Componentes de la arquitectura de hardware.

Categoría	Componentes
Sensores	DHT11 (T y HR), BH1750 (IL), Sensor capacitivo de humedad de suelo v1.2 (SHSC).
Alimentación, protección y regulación	Convertidor AC/DC 12 V, Conector Jack de barril, Fusible 0.5 A, LM7805, resistencias 1 k Ω , capacitores 0.1 μ F y 0.33 μ F, LED rojo.
Circuitos de control para electroválvulas	Optoacoplador PC817, BJT 2N3904, diodo 1N4007, relé de 8 pines HK19F-DC3V-SHG, resistencias 6.8 k Ω y 3.3 k Ω , módulo relé 5 V (1 canal).
Circuitos de activación de electroválvulas	Bornea 2P, LED azul, resistencia 1 k Ω , diodo 1N4007.

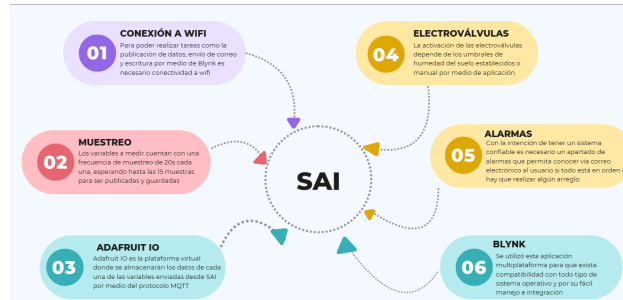
Nota. Esta tabla muestra los componentes seleccionados para la implementación de SAI.

3.3.2. *Arquitectura de Software*

La arquitectura de software del SAI se desarrolló sobre la ESP32. Se ejecutaron muestreos cada 20 s, promediando registros antes de enviarlos por MQTT a Adafruit IO, se decidió utilizar esta plataforma sobre otras por su fácil integración con la ESP32 y sobretodo por la experiencia de manejo adquirida usando Adafruit. Los datos se envían vía MQTT, donde se almacenan y visualizan en Adafruit todas las variables (HR, HRS, IL y T), el estado de las válvulas y alarmas mediante feeds. El riego se controla automáticamente según umbrales de humedad establecidos en las camas de cultivos que se detallarán más adelante o manualmente desde la aplicación Blynk, donde esta aplicación IoT fue elegida sobre otras por su fácil integración de multiplataforma (iOS y Android), fácil programación y donde ofrece una interfaz amigable e intuitiva. Esto se detalla más en el ítem 3.7.2. Adicional a esto, se incluyó un sistema de alarmas para notificar fallas por correo.

Figura 5:

Mapa mental de la arquitectura de software



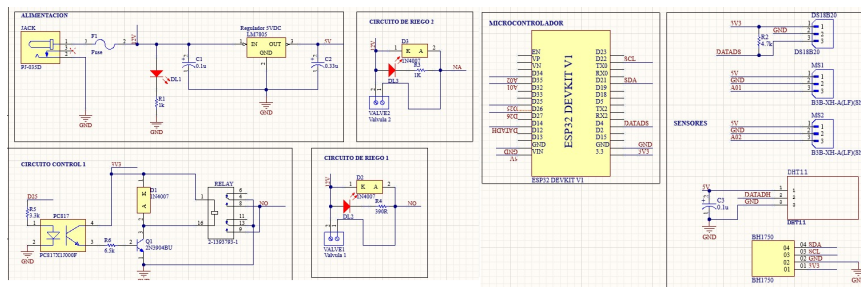
Finalmente, se realizaron pruebas de integración en protoboard para validar la conexión entre hardware y software, verificando encendido, adquisición de datos, control de electroválvulas y transmisión a la nube. Las evidencias detalladas se presentan en los anexos (ver Apéndice B).

3.4. Diseño e implementación de la PCB y encapsulado

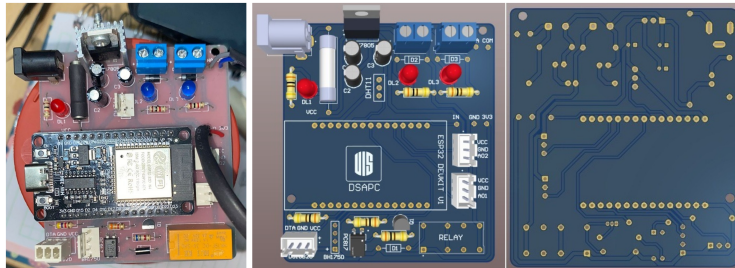
El diseño de la PCB se realizó en Altium Designer, en una única capa para facilitar el ensamblaje y la integración de las cuatro etapas funcionales planificadas. Luego de probar y montar el circuito de la figura 4 en protoboard (Ver evidencias en el Anexo B), se diseñó un esquemático utilizando los componentes de la tabla 1 obteniendo el circuito que se ve en la figura 6 que sirve para diseñar los paths de la PCB. Para más detalle ver Anexo B.

Figura 6:

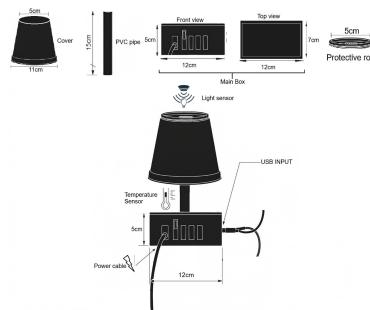
Esquemático principal



La tarjeta, tiene 66.8 × 75.7 mm, la ubicación de conectores y orificios de montaje para un acceso ordenado a alimentación, sensores y electroválvulas (Figura 7).

Figura 7:*Diseño 3D - Vista superior e inferior*

Proteger la electrónica en condiciones de campo, se empleó un encapsulado plástico de $12 \times 5 \times 7$ cm, con espacio para la PCB y ventilación adecuada. El sistema se instaló sobre un mástil en PVC de 15 cm, que facilitó el orden del cableado y el montaje del sensor de luz. En la parte superior se añadió una cubierta transparente que permitió la exposición solar del sensor sin comprometer su protección (Figura 8).

Figura 8:*Encapsulado y montaje de SAI*

3.5. Sistema de riego

El sistema se implementó con una tubería principal en PVC conectada a las electroválvulas, instalada en el techo del invernadero y derivada hacia cada cama de cultivo. La distribución interna se hizo con tres ramales de manguera por cama, separados 20 cm y perforados con orificios bidireccionales para asegurar uniformidad; de esta forma se garantiza regar sobre la planta para el uso eficiente del agua. Finalmente, se probaron las válvulas, verificando caudal y homogeneidad del riego. Se hizo un diseño 3D como guía de diseño y compararla con la versión final (Figura 9).

Figura 9:

Sistema de Riego 3D & Sistema de Riego Real

**3.6. Calibración de sensores**

Con el fin de mejorar la precisión de las variables registradas, se realizó un proceso de calibración empleando como referencia la estación HOBO . Se llevaron a cabo dos procedimientos diferenciados: uno para los sensores de T, HR e IL, y otro para los sensores de HRS. Se hizo uso del entorno de Google Colab para procesar y depurar los datos, dado que permite ejecutar códigos de Python en la nube sin requerir instalación local y facilita la integración con librerías de análisis. El registro completo se incluye en anexos (ver Apéndice A).

3.6.1. Calibración de sensores de T, HR e IL

Se realizó una campaña de medición de 23 horas con intervalos de 5 minutos, lo que permitió registrar la dinámica diaria de T, HR e IL y compararlas entre SAI y HOBO. Cabe resaltar que para comparar los datos de IL de HOBO vs SAI se usó una relación aproximada de PAR a luxes usando el convertidor de Waveform Lighting explicado en el marco teórico. La temperatura se analizó en ventanas de 4 h (Tabla 2), la HR y la IL se realizaron en franjas de 6 h, por lo que se unificaron en una sola tabla (Tabla 3) para presentar resúmenes por tramos del ciclo diurno y nocturno.

Tabla 2:

Resumen de T por franjas de 4 horas entre sensores SAI y HOBO.

Franja horaria	SAI (°C)			HOBO (°C)		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
12:00 PM – 4:00 PM	28.1	39.3	33.9	24.9	31.3	28.6
4:00 PM – 8:00 PM	23.9	30.9	27.7	21.3	25.7	23.2
8:00 PM – 12:00 AM	23.5	25.6	24.5	20.2	22.0	20.8
12:00 AM – 4:00 AM	22.3	24.8	23.6	19.2	20.9	20.2
4:00 AM – 8:00 AM	22.3	38.0	27.6	19.6	24.5	21.7
8:00 AM – 12:00 PM	32.6	38.6	36.1	25.7	31.3	27.7

Nota. Esta tabla muestra la evaluación de T seccionada por tramos de 4 horas donde se visualizan el promedio, máximo y mínimo de cada sistema.

Tabla 3:

Resumen de HR e IL por franjas de 6 horas para SAI y HOBO.

Franja horaria	Humedad Relativa (HR, %)						Intensidad Lumínica (IL, lux)					
	SAI			HOBO			SAI			HOBO		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
12:00 PM – 6:00 PM	32.9	65.9	47.5	63.2	87.9	76.1	854	50011	17081	922	55188	21867
6:00 PM – 12:00 AM	62.0	76.4	70.0	84.0	95.3	91.6	0	68	6	52	93	62
12:00 AM – 6:00 AM	69.3	77.8	72.4	77.2	96.7	89.1	0	0	0	52	52	52
6:00 AM – 12:00 PM	25.7	73.5	47.1	56.5	78.7	65.6	814	54613	26686	705	62692	23111

Nota. Esta tabla muestra la evaluación de HR e IL seccionada por tramos de 6 horas donde se visualizan el promedio, máximo y mínimo de cada sistema.

3.6.2. Calibración de sensores de HRS 1 & 2:

La calibración del sensor de humedad de suelo (HRS) se realizó en tres fases: selección de 4 muestras por cama de 500 g, secado de muestras a 70,°C durante 72 horas y ensayo de saturación con pulsos de 20 ml cada 5 minutos. La tabla ?? muestra los valores ADC de los sensores de HRS

(SAI) y el VWC de los sensores HOBO, tomados hasta 200 mL ya que a partir de ese punto se presenta la saturación del suelo. El valor ADC corresponde a la lectura cruda entregada por los sensores de HRS de SAI, la cual requiere calibración frente a la referencia para transformarse en una medida de humedad en unidades físicas. Las evidencias se pueden observar detalladamente en anexos (ver Anexo B).

Tabla 4:

Relación entre volumen de agua aplicado y valores ADC y VWC promedio en cada cama.

H ₂ O [ml]	Cama 1		Cama 2	
	ADC promedio	VWC promedio	ADC promedio	VWC promedio
0	2504	-0.0912	2533	-0.1028
40	2175	-0.0872	1703	-0.1005
80	1426	0.0668	1379	0.0575
120	1124	0.1563	1197	0.1271
160	1100	0.2236	1154	0.1449
200	1081	0.2678	1123	0.1556

Nota. Esta tabla es soporte de la caracterización del VWC y la medida ADC cada 40ml de agua.

3.7. Implementación final en campo

Ya como parte final se realizó la instalación integral de SAI, La siembra del cultivo y la implementación de la App móvil, con sus respectivas pruebas de funcionamiento. (Ver Anexo B). Justo como en el modelo 3D de la Figura 9 se instaló el sistema (Figura 10) y se verificó el correcto funcionamiento en cuanto a todas las funciones como encendido, toma de datos, publicación y activación de riego (Ver Anexo B). El sistema de riego se controló a partir de los valores de HRS de cada cama de cultivo. Para ello se establecieron umbrales diferenciados, definidos en 70 % cama 1 y 50 % cama 2 regando solamente en horas de la mañana. Esto con el fin de evaluar el comportamiento del cultivo bajo distintos niveles de HRS. En caso de que HRS esté por debajo del umbral, el sistema acciona automáticamente las electroválvulas correspondientes durante 20 segundos.

Figura 10:*Implementación Final***3.7.1. Siembra del cultivo**

Previo a la siembra, se realizaron labores de arado y rastrillado. Ya luego sobre el sustrato, se sembraron las semillas de cilantro con los indicativos previos (Figura 2). Con ello, se dio inicio a la etapa de validación del cultivo bajo el esquema de riego automatizado y el monitoreo continuo del SAI por un periodo de 7 a 9 semanas. El registro dio inicio a partir de la cuarta semana de julio, terminando la segunda semana de septiembre de 2025.

Figura 11:*Proceso de arado del sustrato y siembra***3.7.2. Implementación del App móvil**

Como complemento, se utilizó una aplicación móvil con el fin de facilitar la interacción entre el usuario y el sistema en tiempo real. Se utilizó la aplicación Blynk por su fácil manejo y có-

moda integración a cualquier sistema IoT; para establecer comunicación entre SAI y la aplicación, es necesario realizar un proceso de autenticación de credenciales únicas establecidas por Blynk. De esta manera, SAI recibe y envía información mediante pines virtuales. Para realizar la vinculación de pines, es necesario crear los respectivos Datastreams que se asignan a las variables a controlar o monitorear. Habiendo asignado los pines virtuales se procede a realizar la interfaz del aplicativo que verá y controlará el usuario según las necesidades del sistema agrícola. (ver Apéndice B) Esta app cuenta con un esquema de conmutación manual, lo que permite al usuario abrir o cerrar las válvulas de manera remota según sus necesidades, y también estar al tanto de las variables desde cualquier lugar o que se quiera gestionar el riego de forma independiente, incluso modificar los umbrales de riego. Las prácticas se pueden evidenciar en los anexos (ver Apéndice B).

4. Análisis y resultados

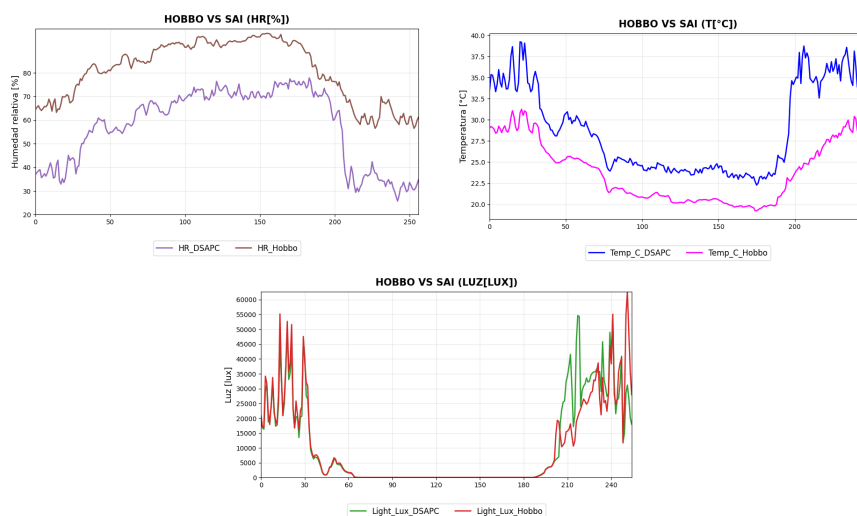
En este capítulo se evalúa el prototipo SAI en invernadero, analizando la confiabilidad de sus mediciones, la calidad de las calibraciones y el desempeño del riego automatizado frente a los objetivos de monitoreo, comunicación, control y registro de datos.

4.1. Resultados de calibración

Se graficaron las variables T, HR e IL comparando ambos sistemas. Como se ve en la Figura 12, el comportamiento de las variables es parecido e incluso para IL algunos valores son similares. Para ver las imágenes a detalle, ver Anexo B.

Figura 12:

HOBBO vs SAI (T, HR E IL)



Tras aplicar un ajuste lineal con respecto a HOBBO, se calcularon los errores MAE, MAPE y RMSE. Para T (DHT11) y HR(DHT11) el ajuste mostró errores bajos, con un MAE de $\approx 0,98^{\circ}\text{C}$ para T y $\approx 3,7\%$ (Tabla 5), garantizando buena aproximación a la referencia. Para IL (BH1750), se tomó la decisión de no calibrarlo, ya que el sensor presentó el mismo comportamiento durante las primeras 6 horas y el error calculado fue el que se presenta en la Tabla 5. Justo en ese punto la luz solar llega con la misma intensidad y posición sin interferencia. También se debe considerar que la conversión de PAR a Lux es una aproximación, lo cual puede influir en la medición; por

esto se toma esta decisión. El procedimiento completo se puede ver en el Anexo A.

Tabla 5:

Resumen de ajustes y errores de calibración

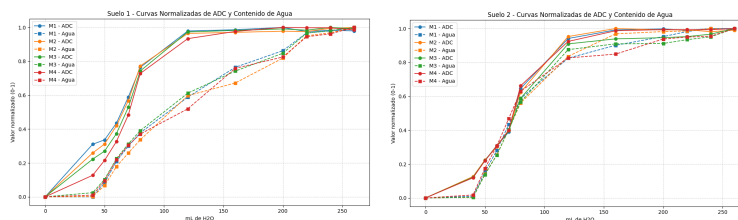
Variable	Ajuste	MAE	RMSE	MAPE
T (DHT11)	$T_{ajust} \approx 0,6446 \cdot T_{SAI} + 5,2724$	0,98 °C	1,39 °C	3,93 %
HR (DHT11)	$HR_{ajust} \approx 0,7329 \cdot HR_{SAI} + 38,8242$	3,70 %	4,70 %	4,72 %
IL (BH1750)	Sin ajuste	1298,55 lux	2314,45 lux	16,35 %

Nota. Tabla de ajustes relacionados a las métricas de error. La variable IL no presenta ajuste por una relación no directa y por el comportamiento evidenciado

Para poder ver gráficamente la comparación de SAI vs HOBO, Se hizo una normalización de 0-1 de los valores ADC de SAI y los valores VWC de HOBO, lo cual deja ver en la figura 13, la curva de saturación de ambos sistemas.

Figura 13:

Gráfico de HRS normalizado HOBO vs SAI (Suelo 1 & 2)



Posteriormente, se aplicó un ajuste polinomial para obtener los coeficientes de calibración y evaluar el desempeño del sensor. Se probaron los diferentes modelos de grado 2 y grado 3; el que menor error tuvo fue el de grado 3, como se puede apreciar en la tabla 6, aunque no por mucho. Debido a esto, el modelo de grado tres fue el seleccionado. El procedimiento completo se puede ver en el Anexo A.

Tabla 6:

Modelos de calibración HRS para suelos 1 & 2 con sus métricas de error.

Suelo	Modelo	Ecuación de ajuste	MAE	RMSE
1	Cuadrático	$y = 1,95 \times 10^{-7}x^2 - 9,51 \times 10^{-4}x + 1,076$	0.0225	0.0299
1	Cúbico	$y = -2,12 \times 10^{-10}x^3 + 1,33 \times 10^{-6}x^2 - 2,90 \times 10^{-3}x + 2,121$	0.0237	0.0278
2	Cuadrático	$y = -2,46 \times 10^{-10}x^2 - 1,88 \times 10^{-4}x + 0,364$	0.0335	0.0537
2	Cúbico	$y = -4,99 \times 10^{-12}x^3 + 2,70 \times 10^{-8}x^2 - 2,36 \times 10^{-4}x + 0,390$	0.0334	0.0536

Nota. Esta tabla muestra dos ajustes para la variable HRS por suelo con los respectivos errores calculados para dichos ajustes.

4.2. Evolución del cultivo y desempeño de SAI en Campo

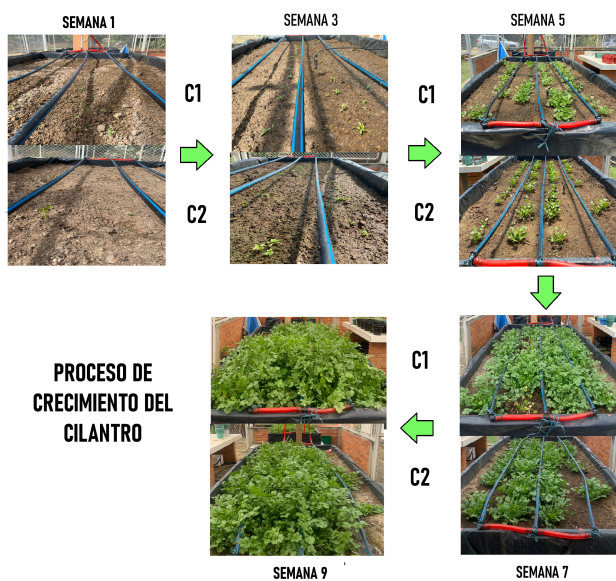
SAI fue evaluado durante la etapa de crecimiento del cilantro hasta su cultivo analizando el desempeño de SAI en campo con el control de riego en relación a la humedad.

4.2.1. Evolución del cultivo

Posterior a la siembra, el cilantro atravesó un periodo de germinación y crecimiento durante 9 semanas, cuyo avance se resume en la Figura 14. Durante el periodo de crecimiento, el cilantro se expuso a una temporada seca entre julio y septiembre que se da en la ciudad Bucaramanga, Santander, donde presentan menos lluvias, alta humedad relativa, temperaturas estables y mayor radiación solar ((13)). En la semana 5 se inició la fertilización con Nitra.SAM 28-4-0-6(S) y YaraMila 12-24-12-2 (MgO), aplicando una solución preparada con 50 g de Nitra.SAM y 25 g de YaraMila en 10 L de agua, de la cual se dosificaron 20 mL por planta. Este procedimiento se repitió en dos ocasiones. En la semana 8, ante la aparición de áfidos, fue necesario aplicar insecticidas, específicamente Invetrina y Sunfire 24 SC.

Figura 14:

Proceso de crecimiento del cultivo hasta la cosecha



4.2.2. *Desempeño en Campo: Control de riego.*

La Tabla 7 muestra el comportamiento semanal de la humedad en la cama 1 (C1) y cama 2 (C2). En la cama 1 (umbral 70%), los promedios estuvieron entre 82.9% y 86.9%, con más del 95% del tiempo en rango. En la cama 2 (umbral 50%), los valores oscilaron entre 67.3% y 75.0%, presentando descensos hasta 23% en la semana 3–5 y posteriores recuperaciones superiores al 90%. Aunque se procuró no superar el 90%, el exceso de humedad se explicó por la baja evapotranspiración del invernadero y la alta retención de agua del sustrato, lo que prolongó la humedad tras cada riego.

Tabla 7:

Comportamiento de la HRS durante el periodo de cultivo

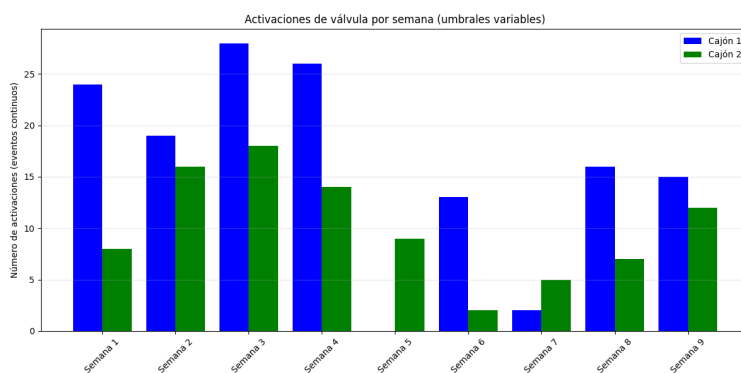
Periodo	Humedad media C1 (%)	% en rango C1	Humedad media C2 (%)	% en rango C2
Semana 0-1	86.86	99.68	75.05	95.83
Semana 1-3	83.69	82.05	71.29	64.42
Semana 3-5	85.64	95.19	67.35	23.08
Semana 5-7	84.98	98.08	69.23	98.72
Semana 7-9	82.97	79.10	68.73	90.68

Nota. Esta tabla muestra el promedio de humedad y el porcentaje de datos en el rango necesitado cada dos semanas.

En la figura 15 se evidencia la cantidad de veces que se activó la válvula desde la semana 1 a la 9. Es importante señalar que en las últimas cuatro semanas se implementó el control mediante la app móvil, lo que permitió modificar el umbral de riego en tiempo real. Esto explica la variación observada en el porcentaje en rango, al depender de los ajustes hechos en la app. Para ver la imagen con más detalle ver el Anexo B.

Figura 15:

Gráfico de activación de válvulas por semana



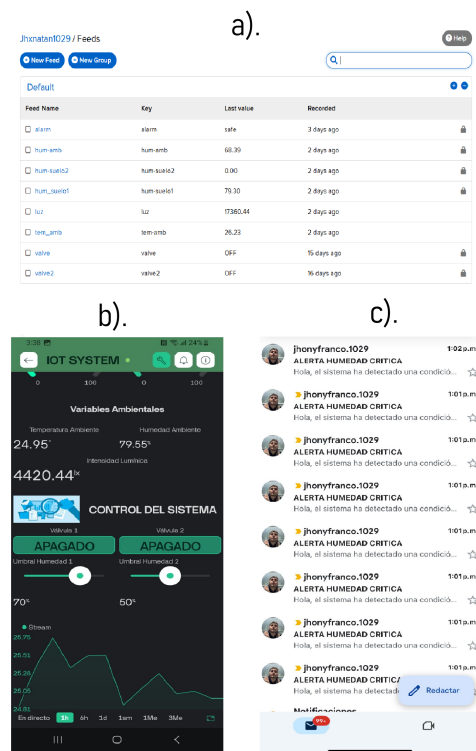
4.3. Funcionamiento IoT y plataforma de visualización

Se evidenció el correcto funcionamiento del sistema IoT mediante el registro en tiempo real de las variables ambientales en Adafruit IO, el ajuste remoto de umbrales de riego desde la app móvil y la recepción de notificaciones por correo electrónico ante fallas de conexión. La Figura 16

muestra un resumen de estas interfaces donde cada herramienta a disposición deja entrever que cada fase de comunicación, control y sistema de alertas se complementan usando la IoT. Los videos explicativos de cómo se logró obtener datos en Adafruit IO, cómo realizamos la vinculación de Blynk, explicación del código y la notificación de fallas por correo electrónico podemos apreciarlos en el apartado de “VIDEOS EXPLICATIVOS” en Anexo B.

Figura 16:

Conexión IoT: (a) Adafruit IO, (b) app móvil y (c) notificación por correo.



4.4. Comparación con estación HOBO

Durante 9 semanas se registraron las variables T, HRS, HR e IL, para el análisis del comportamiento de los sensores y compararlos con la estación HOBO. La tabla completa se puede ver en el Anexo B. Con estos datos se calcularon diferentes tipos de error, como se muestra en la tabla 8 con el fin de comparar el funcionamiento en campo de los sensores calibrados. Los datos fueron procesados en Google Colab y se calculó el MAE, RMSE y MAPE (%) (Ver Anexo A).

Tabla 8:*Errores de calibración por variable*

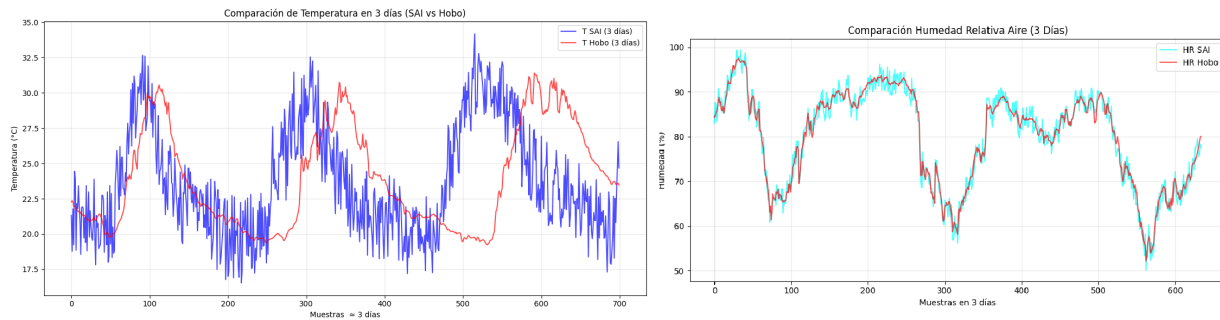
Índice	Variable	MAE	RMSE	MAPE (%)
1	T	1.46	1.70	6.13
2	HRS_1	2.51	2.89	3.58
3	HRS_2	2.46	2.86	2.98
4	HR	1.51	1.74	1.94

Nota. Esta tabla ilustra los errores de calibración por variables que fueron calculados después de 9 semanas.

En comparación con la estación HOBO, los errores de los sensores de HRS 1, HRS 2 y HR se mantuvieron en valores menores al 4%. Para la temperatura se notó que fue el valor con más variaciones, con un error del 6.13%; esto indica a posibles errores de sincronización de datos, fallas en lecturas u otros factores como la ubicación que influyeron más sobre esta variable. En la Figura 17 se aprecia cómo fue el comportamiento de las variables de HR y T en 3 días de registro. Las curvas de humedad y temperatura del SAI siguen el mismo pulso de los ciclos diurnos y nocturnos, con cambios de tamaño similar, lo que muestra mediciones consistentes para ambas variables. Las variaciones de SAI con respecto a HOBO no comprometen la lectura general, ya que con un suavizado corto puede verse igual de limpia sin perder los cambios importantes.

Figura 17:

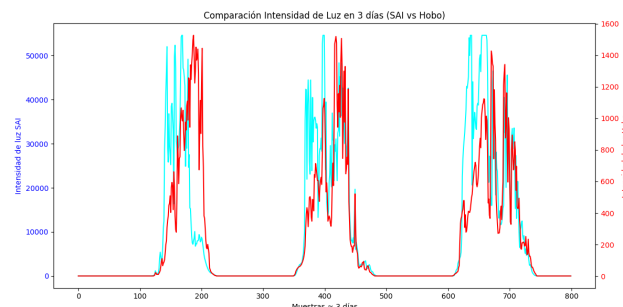
Comparación de SAI vs HOBO de HR & T en un periodo de 3 días



En los tres días, ambas curvas de luz muestran el mismo ciclo diario y coinciden en los momentos de inicio, pico y caída (18), lo que indica que ambos equipos detectan los mismos cambios de iluminación del invernadero. El error se debe a que los sensores perciben la IL de formas distintas (respuesta espectral y escala distintas), pequeñas sombras o reflejos afectan de forma desigual según la ubicación, y cerca del mediodía la orientación/ángulo puede causar variaciones grandes en lux. Los errores calculados son grandes (MAE = 9861.02 lux, RMSE = 18170.09 lux y MAPE = 2631.78 %), principalmente porque HOBBO mide radiación PAR y el BH1750 mide en lux, además de la saturación del sensor en alta irradiancia. Cabe resaltar que la falta de sincronización al descargar los datos de HOBO y Adafruit IO afecta la variable. Por lo tanto, se usó más como referencia del comportamiento de la IL que como dato a tener en cuenta.

Figura 18:

Comparación de IL de SAI vs HOBO por un periodo de 3 días

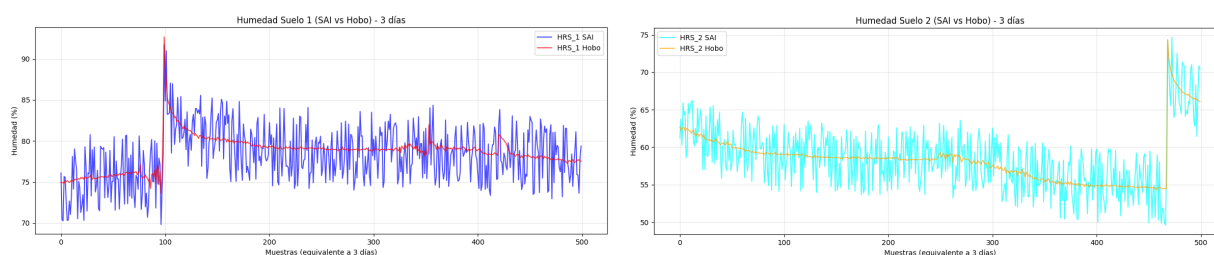


Para el caso de HRS la diferencia de comportamiento entre las camas de cultivo se explica

desde los umbrales de control: en la cama 1 el riego se programa al 70% de HRS y al 50% de HRS para la cama 2. Cuando la válvula se activa, la curva sube rápidamente hasta reingresar al rango de control (Figura 19); de esta forma, se controla el riego. Ya analizando el comportamiento de HOBBO vs SAI marcan la misma tendencia validando el error calculado en la tabla 5 donde no supera el 2%, dejando en claro la confiabilidad de SAI en la medición. Para más información del procesamiento de datos y gráficos ver Anexo A.

Figura 19:

Comparación de HRS 1 & 2 de SAI vs HOBBO por un periodo de 3 días



4.5. Comparación de la producción de cilantro en las camas de cultivo correspondientes

Se tomaron 10 muestras por cama de cultivo y se promediaron las mediciones para tener en cuenta las propiedades físicas del cilantro de SAI como se aprecia en la tabla 9 para ver las principales diferencias entre el cilantro cultivado de cada cama.

Tabla 9:

Promedios de longitudes físicas del cilantro por cama en [cm]

Cama	Prom. tallos	Prom. long. rama	Prom. pares hojas	Prom. long. raíz	Prom. brotes
1	33	24.05	3.11	19.97	10.40
2	31.5	21.20	2.73	17.84	11.22

Nota. Esta tabla muestra los resultados biológicos de las propiedades físicas obtenidos por cada cama al momento de cosechar.

Después de realizar las mediciones, las muestras del cilantro por cama pasaron por un proceso de secado durante 72h para poder hacer un análisis de la biomasa total producida por cada cama como se muestra en la tabla 10. El procedimiento se puede apreciar en Anexo B

Tabla 10:

Mediciones de hojas y raíces utilizadas para el cálculo de la biomasa total y biomasa por individuo en [g]

CAMA	TOTAL HOJAS	PROMEDIO HOJAS PI	TOTAL RAÍCES	PROMEDIO RAÍCES PI	BIOMASA TOTAL	BIOMASA PI
1	39.5854	3.95854	3.7054	0.37054	43.2908	4.32908
2	37.8296	3.78296	4.8201	0.48201	42.6497	4.26497

Nota. Esta tabla es soporte de la biomasa total obtenida después de un proceso de secado para evaluar las condiciones de humedad y su impacto.

Teniendo en cuenta las tablas 9 y 10, se observa que las diferencias entre la biomasa total y la biomasa por individuo (Biomasa PI) en las dos camas de cultivo no resultan estadísticamente significativas. Esto indica que es posible trabajar con un umbral de humedad más bajo sin comprometer la producción ni la calidad del cilantro. En particular, la cama 1 operó con un umbral del 70% y la cama 2 con un 50%, obteniéndose resultados similares en biomasa. Este comportamiento es relevante, ya que el principal órgano de consumo es la hoja, lo que respalda la viabilidad de optimizar el riego reduciendo el consumo de agua sin afectar el rendimiento del cultivo.

4.6. Comparación experimental y sensorial del cilantro producido por SAI

Para la prueba experimental, se realizó una siembra informal de 13 ejemplares distribuidos en 6 macetas, con el fin de contrastar el desempeño del sistema SAI frente a un manejo no tecnificado. Tras 9 semanas de seguimiento, se observó que varias plantas se marchitaron durante el proceso y que las restantes aún no alcanzaban el desarrollo suficiente para ser cosechadas. La Figura 20 ilustra esta situación, donde se aprecia la producción obtenida de manera informal sin control de riego ni monitoreo de variables, ni las prácticas agrónomas necesarias para el desarrollo completo de la planta, estas muestras informales se aprecia con un follaje mínimo y con ramas muy delgadas en contraste con el cilantro cultivado mediante el SAI (Ver figura 14). Esta comparación

evidencia que, al cabo de 9 semanas, el SAI permitió alcanzar un producto competente y uniforme, mientras que en condiciones no controladas el crecimiento resultó limitado e inconsistente. Para más detalle ver Anexo B

Figura 20:

Cultivo informal de cilantro



Para complementar la comparación sensorial se entregaron muestras de cilantro producido por el SAI a estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, quienes evaluaron su calidad mediante una encuesta sobre aroma, frescura, sabor y color, con escala de 1 (muy malo) a 5 (muy satisfactorio). Los resultados evidencian alta aceptación: el aroma fue el atributo mejor calificado (4.56/5), seguido de la apariencia (4.31/5) y la experiencia global (4.28/5). El sabor (4.09/5) y la frescura (4.00/5) también obtuvieron valoraciones positivas, aunque señalan oportunidades de mejora en el manejo postcosecha. En la comparación con el producto convencional, el cilantro SAI alcanzó 4.28/5, considerándose competitivo en calidad. Además, el 84.4% de los encuestados manifestó intención de compra, 12.5% se mostró indeciso y ninguno lo descartó, lo que confirma la viabilidad del cultivo como alternativa productiva y sostenible. Los resultados de la encuesta se pueden ver en el Anexo B.

4.7. Validación de la solución propuesta

La Tabla 11 sintetiza la forma en que el prototipo del Sistema Automatizado IoT (SAI) respondió al problema planteado. Se muestran los elementos principales identificados en la investigación y la evidencia experimental que respalda su cumplimiento. Los videos que evidencian el funcionamiento del sistema se pueden ver en anexos (Ver Anexo B).

Tabla 11:

Cumplimiento de criterios del problema planteado

Elemento del problema	Evidencia de solución	Cumplimiento
Monitoreo en tiempo real de T, HR, IL y HRS	Sensores calibrados y comparados con HOBO	✓
Automatización del riego	Válvulas ON/OFF activadas según el umbral de humedad	✓
Comunicación inalámbrica y registro	Publicación en Adafruit y control remoto mediante una App	✓
Alarmas ante fallas	Notificaciones vía correo electrónico	✓
Calidad del cultivo	Calidad del cilantro comparándolo con un producto del mercado	✓

Nota. Esta tabla ilustra los desafíos planteados y el cumplimiento realizado.

5. Conclusiones

El desarrollo del Sistema Agrícola IoT (SAI) permitió alcanzar de manera satisfactoria los objetivos propuestos, integrando la medición de variables ambientales y del sustrato (temperatura, luminosidad, humedad relativa y humedad del suelo), junto con la comunicación en la nube y el control de riego en modos automático y manual. Gracias a esta integración fue posible lograr un monitoreo continuo, con trazabilidad de datos y una actuación confiable en campo, garantizando que las variables críticas del cultivo fueran registradas y gestionadas en tiempo real. Un aspecto clave fue la calibración de sensores frente a la estación HOBO, que permitió reducir sesgos de medición y mantener los errores dentro de márgenes prácticos. Cabe resaltar que el conversor ADC de la ESP32 no resulta ser eficiente, por ende se requiere una calibración externa. Los ajustes lineales aplicados a la temperatura y la humedad relativa, así como el modelo polinómico para la humedad del sustrato, aportaron mayor precisión en la toma de decisiones de riego y aumentaron la confiabilidad de las acciones de control.

De igual forma, los resultados relacionados con la biomasa del cultivo evidencian implicaciones agronómicas y ambientales significativas, ya que permiten optimizar el uso de un recurso tan limitado y esencial como el agua. Esto se traduce en prácticas de riego más eficientes y sostenibles, con un impacto positivo tanto en la productividad del cultivo como en la conservación hídrica. Además, la evaluación sensorial del cilantro mostró calificaciones destacadas en atributos como aroma, frescura, sabor y color, lo cual confirma su competitividad en calidad y aceptación por parte de los consumidores. Sin embargo, es importante subrayar que la encuesta se aplicó a un grupo reducido de personas y que las características sensoriales son subjetivas. En consecuencia, futuros trabajos deberían ampliar el número de participantes y complementar este análisis con la evaluación de propiedades intrínsecas de los productos.

En conjunto, este trabajo demuestra la viabilidad y potencial de replicabilidad del sistema en contextos de agricultura urbana, aportando beneficios directos en la eficiencia del riego, el ahorro de agua y la calidad del producto. Asimismo, sienta bases sólidas para el desarrollo de futuras implementaciones de sistemas agrícolas inteligentes en el país, promoviendo la incorporación de la tecnología en el sector agroalimentario como una herramienta para enfrentar los desafíos de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

6. Recomendaciones

1. Se sugiere que la alimentación del sistema se realice mediante paneles solares, en lugar de depender de la red eléctrica. Esto no solo mejora la portabilidad y la continuidad del servicio ante fallas de energía, sino que también facilita la instalación en zonas rurales con infraestructura limitada. Además de un sistema de recolección de agua para el riego.
2. Se sugiere descartar el uso de un optoacoplador adicional, ya que estos se utilizan cuando hay fuentes de tensión diferentes. Se recomienda, en su lugar, utilizar módulos relé de 5V, los cuales ya incorporan protección básica frente a transitorios, interferencias electromagnéticas y ruido; y además, son más económicos. También se recomienda cambiar el regulador LM7805, ya que este es un modelo ineficiente; por lo tanto, se sugiere el uso de uno de conmutación como el LM2596, para una mayor eficiencia.
3. Respecto al manejo de datos, se propone implementar un sistema de almacenamiento híbrido, combinando registros locales con respaldo en la nube. Este enfoque garantiza la disponibilidad de la información aún en casos de interrupciones de conectividad, a la vez que facilita el análisis remoto y el acceso en tiempo real.
4. En términos de limitaciones, el prototipo se validó únicamente en un sitio y con una mezcla de sustrato específica, lo que restringe la generalización inmediata de los resultados. Se recomienda replicar el experimento en distintas temporadas, recalibrar los sensores en cada campaña y documentar de manera sistemática los efectos de borde y la variabilidad espacial, a fin de fortalecer la validez externa del sistema.
5. Asimismo, se recomienda diseñar el sistema bajo un enfoque de escalabilidad, de modo que permita la integración de nuevos sensores o actuadores sin necesidad de modificar la arquitectura principal. Esto facilitaría futuras ampliaciones y la adaptación a distintos escenarios de cultivo.
6. Finalmente, se enfatiza la importancia de incorporar estrategias de ciberseguridad, tales como autenticación robusta, cifrado de datos y control de accesos, con el fin de proteger la integridad del sistema frente a vulnerabilidades propias de los entornos IoT.

Referencias

- Agronegocios (2025). La agricultura de precisión en Colombia ya se usa en el cultivo del aguacate hass. Consultado: 12 de septiembre de 2025.
- Duarte-Casar, R. and Romero-Benavides, J. C. (2021). *Tragia* l. genus: Ethnopharmacological use, phytochemical composition and biological activity. *Plants*, 10(12):2717. Acceso abierto.
- Food and of the United Nations, A. O. (2017). Soil organic carbon: the hidden potential. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b382a255-5bd5-4656-a8cd-e30fffla8bfe/content>. Artículo de acceso abierto.
- Golubkina, N., Skrypnik, L., Logvinenko, L., Zayachkovsky, V., Smirnova, A., Krivenkov, L., Romanov, V., Kharchenko, V., Poluboyarinov, P., Sekara, A., Tallarita, A., and Caruso, G. The edge effect phenomenon in plants: Morphological, biochemical and mineral characteristics of border tissues. 15(1):123.
- Horr, T. and Pradhan, A. K. (2020). Evaluation of public health risk for *Escherichia coli* O157:H7 in cilantro. *Food Research International*, 136:109545.
- HortiPower (2025). Ultimate cilantro plant care guide: Expert tips and benefits of grow lights. Acceso el 2 de octubre de 2025.
- Laguandio Banda, S., Fuentes, C. L., and Chaves, B. (2011). Producción de semilla de cilantro (*Coriandrum sativum* L.) bajo la incidencia de malezas y alternaria. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(2):279–294.
- Leyva-Abascal, L., Luna-Guevara, M. L., López-Olguín, J. F., Juárez-Ramín, D., and Ortega, Y. (2023). Cultivo, cosecha y postcosecha en el sistema productivo cilantro (*Coriandrum sativum* L.). *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 20(3).
- Lighting, W. Convert lux to ppfd – online calculator. <https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lux-to-ppfd-online-calculator>. Acceso abierto.

- Morales, J. P. (1995). *Cultivo de cilantro, cilantro ancho y perejil. Boletín Técnico No. 25*. Fundación de Desarrollo Agropecuario (FDA), Santo Domingo, República Dominicana.
- Omar, H. and Alsharaeh, E. (2024). Improving water retention in sandy soils with high-performance superabsorbent hydrogel systems (sah). *ACS Omega*. Acceso abierto.
- Valencia Villegas, Y. and Sepúlveda Casadiego, Y. (2019). Implementación de sensores en los sistemas de riego automatizado. *REVISTA INGENIERÍA*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).
- Weatherspark (2025). Climate and average weather year round in bucaramanga, colombia. Online data set. consultado en línea.
- World Health Organization (2015). Estimaciones de la oms sobre la carga mundial de enfermedades de transmisión alimentaria. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/200047/WHO_FOS_15.02_spa.pdf. Accedido: 2024-04-07.

Apéndice A. Códigos en Google Colab y Repositorio en GitHub

Se realizó un apartado de Códigos en Google Colab con el fin de centralizar los scripts empleados en la calibración y en el procesamiento de los datos recopilados tanto por el sistema SAI como por la estación de referencia HOBO. Este entorno permitió depurar la información y ejecutar análisis en la nube de manera ágil, asegurando trazabilidad y facilidad de acceso para la evaluación comparativa de las variables ambientales y de humedad de suelo. De forma complementaria, se dispuso un Repositorio en GitHub orientado a compilar la totalidad de los códigos desarrollados durante el proyecto. Allí se incluyen desde los programas básicos empleados para la verificación y calibración de sensores, hasta los destinados a la gestión de actuadores como las electroválvulas, junto con los módulos de publicación de datos en la plataforma Adafruit IO y de envío automático de notificaciones por correo electrónico en caso de alarmas. Finalmente, se integra el código principal que articula todas estas funciones, constituyéndose en la base operativa del sistema implementado.

Apéndice B. Pruebas de funcionamiento, tablas y evidencias audiovisuales

En la carpeta de Google Drive se recopilan códigos, documentos, imágenes y videos que dan cuenta del proceso completo de desarrollo del proyecto. Algunos de estos archivos resultaron fundamentales para la toma de decisiones técnicas y metodológicas, mientras que otros constituyen evidencias gráficas y audiovisuales que respaldan los resultados alcanzados en cada fase. En conjunto, este material no solo sirve como constancia del trabajo realizado, sino también como soporte documental que refuerza la validez y la trazabilidad del proyecto. El contenido como fotos, videos y documentos están disponibles en el siguiente enlace de Google Drive: Contenido del DSAPC. A través de estos materiales audiovisuales, se puede observar la evolución del cultivo y las condiciones ambientales en las que se llevó a cabo el experimento.

Apéndice C. Estudio del suelo

En el presente anexo se incluyen los resultados del análisis de suelo realizado a una muestra de 500g en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales (LQCI) de la Universidad Industrial de Santander. El informe presenta los principales parámetros físicos y químicos evaluados, tales como pH, contenido de materia orgánica, capacidad de retención de agua y concentración de macro y micronutrientes. Estos resultados permitieron identificar tanto las fortalezas del sustrato como su pH neutro y buena fertilidad general, como las deficiencias en nitrógeno disponible (N), potasio (K) y zinc (Zn), cuya corrección se consideró necesaria mediante enmiendas. La información consignada en este documento constituye la base técnica para la preparación del sustrato y la posterior implementación del cultivo de cilantro en condiciones controladas.(Estudio del suelo).