



**unl**

Universidad  
Nacional  
de Loja

# Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias  
y los Recursos Naturales No Renovables

Carrera de Electromecánica

Diseño y construcción de prototipo automatizado de  
almácigo de café de especialidad para el laboratorio del  
**CITE.**

Trabajo de Integración Curricular,  
previo a la obtención del título de  
Ingeniero Electromecánico

**AUTOR:**

Carlos David Armijos Carrión

**DIRECTOR:**

Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes, Mg.

Loja- Ecuador 2025

Educamos para **Transformar**



unl

Universidad  
Nacional  
de Loja

Sistema de Información Académico  
Administrativo y Financiero - SIAAF

## CERTIFICADO DE CULMINACIÓN Y APROBACIÓN DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, **ORTEGA REYES CRISTIAN VINICIO**, director del Trabajo de Integración Curricular denominado **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO AUTOMATIZADO DE ALMÁCIGO DE CAFÉ DE ESPECIALIDAD PARA EL LABORATORIO DEL CITE**, perteneciente al estudiante **CARLOS DAVID ARMIJOS CARRION**, con cédula de identidad N° **1105408502**.

### Certifico:

Que luego de haber dirigido el **Trabajo de Integración Curricular**, habiendo realizado una revisión exhaustiva para prevenir y eliminar cualquier forma de plagio, garantizando la debida honestidad académica, se encuentra concluido, aprobado y está en condiciones para ser presentado ante las instancias correspondientes.

Es lo que puedo certificar en honor a la verdad, a fin de que, de así considerarlo pertinente, el/la señor/a docente de la asignatura de **Integración Curricular**, proceda al registro del mismo en el Sistema de Gestión Académico como parte de los requisitos de acreditación de la Unidad de Integración Curricular del mencionado estudiante.

Loja, 2 de Agosto de 2024

F) -----  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR**



Certificado TIC/TT.: UNL-2024-001866

## Autoría

Yo, **Carlos David Armijos Carrión**, declaro ser autor del presente Trabajo de integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Cédula de identidad:** 1105408502.

**Fecha:** 08 de abril del 2025.

**Correo electrónico:** carlos.d.armijos@unl.edu.ec.

**Teléfono:** 0991579276.

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular**

Yo, **Carlos David Armijos Carrión**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **“Diseño y construcción de prototipo automatizado de almácigo de café de especialidad para el laboratorio del CITE.”**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Electromecánico**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar los contenidos de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los diecinueve días del mes de febrero de dos mil veinticinco.

**Firma:**



**Autor:** Carlos David Armijos Carrión.

**Cédula de identidad:** 1105408502.

**Dirección:** Olmedo.

**Correo electrónico:** carlos.d.armijos@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0991579276.

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director del Trabajo de Integración Curricular:** Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes, Mg.

## Dedicatoria

A mis amados padres Samuel Armijos y Edilma Carrión, quienes han sido mi mayor motivación en el día a día, por entregarme todo su amor y apoyo en el estudio, así como sus enseñanzas de la vida. A mis hermanas y hermano María, Sandra, Livia, Diana y Samuel quienes siempre me han brindado su apoyo. A mi querido amor María, que siempre me brindó su apoyo y motivación en mi formación. Los amo.

*Carlos David Armijos Carrión*

## Agradecimiento

A aquellas personas que fueron la base en el desarrollo y personal de mi niñez y adolescencia, a aquellas personas que me motivaron en adentrarme al maravilloso mundo de la ingeniería. A la Universidad Nacional de Loja, a la carrera de Ingeniería Electromecánica de la FEIRNNR.

A los docentes de la carrera de Electromecánica quienes a lo largo de mi años de estudio han aportado sus conocimientos contribuyendo a mi formación académica, así mismo un agradecimiento especial a mi docente tutor el Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes, perteneciente al Centro de Investigaciones Tecnológicas y Energéticas (CITE).

*Carlos David Armijos Carrión*

# Índice de Contenidos

Portada . . . . .	i
Autoría . . . . .	ii
Carta de Autorización . . . . .	iii
Dedicatoria . . . . .	iv
Agradecimiento . . . . .	v
Índice de Contenidos . . . . .	vi
Índice de Tablas . . . . .	ix
Índice de Figuras . . . . .	x
Índice de Anexos . . . . .	xii
Simbología . . . . .	xii
<b>1 Título . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Resumen . . . . .</b>	<b>2</b>
Abstract . . . . .	3
<b>3 Introducción . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>4 Marco Teórico . . . . .</b>	<b>7</b>
4.1 El cultivo de café en la provincia de Loja . . . . .	7
4.2 Generalidades del cultivo de café de especialidad . . . . .	8
4.2.1 Fases fenológicas del café . . . . .	8
4.2.2 Fase de germinación y almácigo . . . . .	9
4.2.3 Variedades de café de especialidad en la provincia de Loja . . . . .	10
4.2.4 Condiciones meteorológicas óptimas para el cultivo de café . . . . .	11
4.2.4.1 Clima . . . . .	11
4.2.4.2 Precipitación . . . . .	11
4.2.4.3 Temperatura . . . . .	11
4.2.4.4 Exposición Solar . . . . .	11
4.3 Invernaderos para cultivo de café . . . . .	12
4.3.1 Características generales de los invernaderos . . . . .	12
4.3.1.1 Cubierta de material traslúcido . . . . .	12
4.3.1.2 Estructura . . . . .	12
4.3.1.3 Ventilación . . . . .	12
4.3.1.4 Control de temperatura y humedad . . . . .	13
4.3.1.5 Sistema de riego . . . . .	13
4.3.2 Modelos y tipos de invernaderos . . . . .	14
4.3.3 Tipos de riego . . . . .	16

4.3.3.1	Riego por aspersión. . . . .	16
4.3.3.2	Riego por goteo. . . . .	17
4.3.3.3	Riego por micro-aspersión. . . . .	17
4.3.3.4	Riego hidropónico. . . . .	17
4.3.3.5	Riego por nebulización. . . . .	17
4.3.3.6	Riego por gravedad. . . . .	17
4.4	Agricultura 4.0 . . . . .	17
4.5	Sensores, actuadores y controladores para el control de un almácigo de café	18
4.5.1	Fuente de alimentación. . . . .	18
4.5.2	Sensor de temperatura humedad relativa DHT22 . . . . .	18
4.5.3	Tarjeta de desarrollo ESP32 . . . . .	18
4.5.4	Bomba de diafragma de alta presión 12V . . . . .	19
4.5.5	Ventilador axial impermeable . . . . .	19
4.5.6	Lámparas led para cultivo . . . . .	20
4.6	Beneficios de la automatización de invernaderos para café. . . . .	20
<b>5</b>	<b>Metodología . . . . .</b>	<b>21</b>
5.1	Área de estudio . . . . .	21
5.2	Procedimiento . . . . .	22
5.2.1	Objetivo específico 1 . . . . .	22
5.2.2	Objetivo específico 2 . . . . .	23
5.2.3	Objetivo específico 3 . . . . .	23
5.3	Procesamiento y análisis de datos . . . . .	26
5.3.1	Tamaño de muestra . . . . .	26
5.3.2	Cálculo de la potencia requerida para el calentamiento del almácigo de café de especialidad . . . . .	26
5.3.2.1	Pared lateral plana externa Datos: . . . . .	28
5.3.2.2	Pared plana interna . . . . .	30
5.3.2.3	Segunda iteración para las paredes laterales . . . . .	32
5.3.2.4	Superficie plana inferior (Piso) . . . . .	33
5.3.2.5	Superficie plana superior (Techo) . . . . .	35
5.3.2.6	Balance energético . . . . .	37
5.3.3	Dimensionamiento de la bomba para el sistema de riego por atomización en el almácigo . . . . .	39
5.4	Validación de cantidad de sensores que permitan cubrir con el área del almácigo. (DHT22) . . . . .	42
5.4.1	Sensor de humedad y temperatura ambiente: DHT22 (AM2302) . . . . .	43
5.5	Conversión ADC del sensor HD-38 . . . . .	44
5.5.1	Cálculo de caudal necesario para renovación de aire. . . . .	45
<b>6</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>49</b>
6.1	Diseño de prototipo no automatizado para almácigo de café de especialidad. . . . .	50
6.2	Diseño y construcción de prototipo automatizado para almácigo de café de especialidad . . . . .	52
6.2.1	Propuesta de diseño . . . . .	52
6.2.1.1	Estructura y características del invernadero. . . . .	52
6.2.1.2	Construcción del invernadero para el almácigo de café. . . . .	53
6.2.2	Preparación y manejo del almácigo de café . . . . .	55

6.2.3	Propuesta de control para automatización de invernadero de almácigo de café de especialidad . . . . .	56
6.2.3.1	Ventilación. . . . .	56
6.2.3.2	Monitoreo de temperatura y humedad ambiente. . . . .	57
6.2.3.3	Sistema de riego. . . . .	58
6.2.3.4	Luz led de cultivo. . . . .	59
6.2.3.5	Flujograma de control. . . . .	61
6.3	Caracterización y comparación de resultados entre almácigo automatizado y no automatizado. . . . .	68
6.3.1	Caracterización y comparación entre prototipos para almácigo de café. . . . .	68
6.3.2	Caracterización y comparación de los colinos de café . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Discusión . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Recomendaciones . . . . .</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>11</b>	<b>Anexos . . . . .</b>	<b>93</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Características óptimas para el desarrollo del cultivo de café en Ecuador. . . . .	12
<b>Tabla 2.</b> Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 18 °C. . . . .	29
<b>Tabla 3.</b> Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 21 °C. . . . .	30
<b>Tabla 4.</b> Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 17,25 °C. . . . .	32
<b>Tabla 5.</b> Segunda iteración para la pared plana externa. . . . .	32
<b>Tabla 6.</b> Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 19,75 °C. . . . .	33
<b>Tabla 7.</b> Segunda iteración para la pared plana interna. . . . .	33
<b>Tabla 8.</b> Propiedades termofísicas del aire a 20.5 °C. . . . .	34
<b>Tabla 9.</b> Propiedades termofísicas del aire a 21.5 °C. . . . .	36
<b>Tabla 10.</b> Coeficientes de pérdidas por conducción y convección en invernadero. . .	39
<b>Tabla 11.</b> Validación del sensor DHT22 en el almácigo . . . . .	43
<b>Tabla 12.</b> Frecuencia de cambios de aire según la temperatura del invernadero . . .	45
<b>Tabla 13.</b> Condiciones adecuadas para el desarrollo del café. . . . .	49
<b>Tabla 14.</b> Proceso de construcción del almácigo de café . . . . .	54
<b>Tabla 15.</b> Proceso de construcción del almácigo de café . . . . .	55
<b>Tabla 16.</b> Costos de construcción de prototipo de almácigo automatizado . . . . .	70
<b>Tabla 17.</b> Prototipo de almácigo no automatizado (forma tradicional) . . . . .	72
<b>Tabla 18.</b> Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad . . . . .	75
<b>Tabla 19.</b> Especificaciones y características de ventilador axial . . . . .	101
<b>Tabla 20.</b> Especificaciones y características del sensor DHT22 . . . . .	101
<b>Tabla 21.</b> Especificaciones y características de higrómetro HD-38 . . . . .	101
<b>Tabla 22.</b> Especificaciones y características de bomba de diafragma de alta presión .	101
<b>Tabla 23.</b> Especificaciones y características de luz de espectro para plantas. . . . .	102

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Principales cultivos en la provincia de Loja en el año 2022 . . . . .	8
<b>Figura 2.</b> Fases fenológicas del café . . . . .	9
<b>Figura 3.</b> Desarrollo de la plántula de café. . . . .	10
<b>Figura 4.</b> Ventilación en invernaderos. . . . .	13
<b>Figura 5.</b> Orientación de invernaderos. . . . .	14
<b>Figura 6.</b> Clasificación de invernaderos. . . . .	14
<b>Figura 7.</b> a) Modelos y tipos de invernaderos . . . . .	15
<b>Figura 8.</b> b) Modelos y tipos de invernaderos. . . . .	16
<b>Figura 9.</b> Diagrama de bloques del SoC ESP32 . . . . .	19
<b>Figura 10.</b> Especificaciones del ventilador axial . . . . .	20
<b>Figura 11.</b> Ubicación del área de estudio . . . . .	21
<b>Figura 12.</b> Circuito térmico equivalente del invernadero. . . . .	27
<b>Figura 13.</b> Circuito térmico equivalente para las paredes planas del almacigo. . . . .	31
<b>Figura 14.</b> Circuito térmico equivalente para las superficie plana inferior (piso). . . . .	35
<b>Figura 15.</b> Circuito térmico equivalente para las superficie plana superior (techo). . . . .	37
<b>Figura 16.</b> Diagrama del almacigo de café. . . . .	40
<b>Figura 17.</b> Curva del sistema de bombeo a diferentes presiones. . . . .	42
<b>Figura 18.</b> Comparación de capturas termográficas del invernadero en distintos momentos y ubicaciones. . . . .	44
<b>Figura 19.</b> Convertidor analógico a digital en un ESP32. . . . .	45
<b>Figura 20.</b> Comportamiento del fluido en el invernadero con un ventilador. . . . .	47
<b>Figura 21.</b> Comportamiento del fluido en el invernadero con un ventilador un extractor . . . . .	47
<b>Figura 22.</b> Comportamiento del fluido en el invernadero con un ventilador y dos extractores. . . . .	48
<b>Figura 23.</b> Diseño del almacigo no automatizado para 150 plántulas de café. . . . .	51
<b>Figura 24.</b> Prototipo no automatizado para almacigo de café. . . . .	51
<b>Figura 25.</b> Diseños propuestos para el prototipo de almacigo de café. . . . .	53
<b>Figura 26.</b> Ventilador axial IP55 . . . . .	57
<b>Figura 27.</b> Módulo sensor DHT22 (AM2302) . . . . .	57
<b>Figura 28.</b> Módulo sensor de humedad del suelo HD-38 anticorrosivo) . . . . .	58
<b>Figura 29.</b> Sistema de riego por atomización. . . . .	59
<b>Figura 30.</b> Espectro de lámpara de cultivo UV-IR . . . . .	59
<b>Figura 31.</b> Propuesta para montaje de sensores y actuadores . . . . .	60
<b>Figura 32.</b> Prototipo automatizado para almacigo de café. . . . .	61
<b>Figura 33.</b> Plataforma IoT del almacigo de café desarrollada en Ubidots . . . . .	65
<b>Figura 34.</b> Funcionamiento del sistema de control para mantener la temperatura adecuada dentro del almacigo . . . . .	66
<b>Figura 35.</b> Funcionamiento del sistema de control para la temperatura dentro del almacigo . . . . .	67
<b>Figura 36.</b> Funcionamiento del sistema de control para la temperatura dentro del almacigo . . . . .	68
<b>Figura 37.</b> Sistema de operación del control en los días 20 y 21 de julio de 2024. . . . .	69

<b>Figura 38.</b> Plantas de café enumeradas para escoger la muestra. . . . .	73
<b>Figura 39.</b> Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de planta (Automatizado). . . . .	75
<b>Figura 40.</b> Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de la planta (No Automatizado). . . . .	76
<b>Figura 41.</b> Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (Automatizado). . . . .	76
<b>Figura 42.</b> Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (No Automatizado). . . . .	77
<b>Figura 43.</b> Colinos de café afectados por hongos en el prototipo no automatizado. .	79
<b>Figura 44.</b> Planta de almácigo no automatizado atacada por mancha del hierro. . .	80
<b>Figura 45.</b> Altura y diámetro de copa de la planta en el ambiente automatizado. . .	80
<b>Figura 46.</b> Altura y diámetro de copa de la planta en el ambiente no automatizado.	81
<b>Figura 47.</b> Número de hojas en las plantas del prototipo no automatizado. . . . .	81
<b>Figura 48.</b> Número de hojas de las plantas de café en el prototipo automatizado. .	82
<b>Figura 49.</b> Propiedades del aire a la presión de 1 atm . . . . .	95
<b>Figura 50.</b> Valores de rugosidad para distintos materiales . . . . .	96
<b>Figura 51.</b> Coefficiente de rugosidad de Hazen-Williams . . . . .	96
<b>Figura 52.</b> Pérdidas en codo redondeado . . . . .	97
<b>Figura 53.</b> Pérdidas en empalmes en T . . . . .	97
<b>Figura 54.</b> Pérdidas en salida de depósito, orificio borda . . . . .	97
<b>Figura 55.</b> Pérdidas en estrechamiento brusco . . . . .	97
<b>Figura 56.</b> Anemómetro Kestrel 4500NV Electronic Hand Held Weather Meter . . .	98
<b>Figura 57.</b> GPS portátil Garmin eTrex Venture HC . . . . .	98
<b>Figura 58.</b> Cámara termográfica NOYafa NF-521. . . . .	99
<b>Figura 59.</b> Cámara termográfica Hikmicro B01. . . . .	100
<b>Figura 60.</b> Datasheet Hikmicro B01. . . . .	100
<b>Figura 61.</b> Dimensiones del kit de riego por atomización . . . . .	102
<b>Figura 62.</b> Distribución T de Student. . . . .	103

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1.</b> Oficio de aprobación del proyecto de tesis y designación del tutor de tesis.	93
<b>Anexo 2.</b> Planos de prototipo para almácigo de café automatizado y de forma tradicional. Esquema de conexión de circuito de control y fuerza para automatización del prototipo. . . . .	94
<b>Anexo 3.</b> Tablas de propiedades del aire a presión de 1 atm. . . . .	95
<b>Anexo 4.</b> Cuadros y Ábacos (Ingeniería fluidomecánica) . . . . .	96
<b>Anexo 5.</b> Equipos de medición. . . . .	98
<b>Anexo 6.</b> Cámara termográfica NOYafa NF-521 y Hikmicro B01 . . . . .	99
<b>Anexo 7.</b> Tablas e imágenes de especificaciones y características de componentes del sistema de control. . . . .	101
<b>Anexo 8.</b> Tabla de T de Student en un extremo. . . . .	103
<b>Anexo 9.</b> Programación en Arduino IDE para el control del almácigo de café. . .	104
<b>Anexo 10.</b> Certificación de traducción del resumen . . . . .	105

# 1. Título

Diseño y construcción de prototipo automatizado de almácigo de café de especialidad para el laboratorio del CITE.

## 2. Resumen

El proyecto se centra en el diseño y construcción de un prototipo automatizado para almácigos de café de especialidad, cuyo objetivo es optimizar el desarrollo de las plántulas de café mediante tecnologías de agricultura 4.0. Para la automatización se emplearon sensores de temperatura y humedad (DHT22 y HD38), sistemas de riego por atomización, sistemas de calefacción y ventilación, controlados por una placa de desarrollo ESP32 vinculada a una plataforma IoT (Ubidots), con protocolo de comunicación MQTT, lo que permitió garantizar un microclima adecuado. El prototipo fue evaluado mediante la comparación con un sistema tradicional en términos de crecimiento, sanidad y uso de recursos. La metodología incluyó un enfoque mixto, análisis cualitativo para caracterizar las condiciones edafoclimáticas e invernaderos y cuantitativos para validar las condiciones ambientales. La investigación reveló que en condiciones normales el sistema automatizado mantuvo rangos de temperatura y humedad óptimos para el crecimiento, lo que favoreció en tasa de supervivencia, menor incidencia de enfermedades y mayor crecimiento de la planta. La investigación concluye que el uso de la automatización en almácigos de café es una alternativa viable para mejorar la producción y calidad de almácigos en lugares con condiciones similares.

**Palabras claves:** Automatización, almácigo de café, Diseño y construcción, sensores, control del microclima.

## Abstract

The project focuses on the design and construction of an automated prototype for specialty coffee seedlings, which aims to optimize the development of coffee plants through 4.0 agriculture technologies. For automation, temperature and humidity sensors (DHT22 and HD38), atomization irrigation systems, heating and ventilation systems were employed, all controlled by an ESP32 development board linked to an IoT (Ubidots), platform using the MQTT communication protocol, ensuring an adequate microclimate. The prototype was evaluated by comparing it with a traditional system in terms of growth, health, and resource usage. The methodology included a mixed approach, with qualitative analysis to characterize soil and climatic conditions and greenhouses, and quantitative analysis to validate environmental conditions. The research revealed that under normal conditions, the automated system maintained optimal temperature and humidity ranges for growth, which resulted in a higher survival rate, lower disease incidence, and greater plant growth. The study concludes that the use of automation in coffee seedling production is a viable alternative to improve the production and quality of seedlings in areas with similar conditions.

**Keywords:** Automation, coffee seedling, design and construction, sensors, micro-climate control.

### 3. Introducción

El objetivo del proyecto “Diseño y construcción de un prototipo automatizado para almácigo de café de especialidad para el laboratorio del CITE” es proponer un diseño y construcción de un prototipo de almácigo de café mediante el estudio y automatización del proceso con enfoque a la agricultura 4.0 utilizando tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT). Según Valenzuela et al. (2023) la Agricultura 4.0 se fundamenta en aprovechar los datos proporcionados por los sensores agrícolas, que son recopilados y centralizados a través de Internet, permitiendo la toma de decisiones inteligentes, ya sea de forma inmediata o en un momento posterior.

La producción de café en el Ecuador se encuentra ampliamente distribuida. En el año 2012, este cultivo ocupaba áreas significativas, ya sea como monocultivo o en asociación con otros cultivos. Además en los últimos años en la provincia de Loja, este cultivo ha adquirido relevancia debido a su rentabilidad creciente en el mercado, por lo que se le ha brindado mayor atención desde la germinación hasta el consumo. (MAGAP, 2017). Sin embargo, en las últimas dos décadas, la producción de café en la provincia ha disminuido drásticamente, cuyos factores principales son la baja demanda en el mercado y la propagación de enfermedades como la roya, causada por el hongo *Hemileia vastatrix*. En base a ello, para contrarrestar esta situación negativa, surge la alternativa de enfocarse en la producción de café de especialidad, priorizando la calidad sobre la cantidad. A pesar de que solo el 20% del cultivo de café se encuentra tecnificado o semi-tecnificado ha demostrado resultados positivos en comparación con métodos tradicionales (Vázquez, 2023).

La presente investigación se centra en la automatización en la fase de almácigo, que inicia cuando las plántulas de café han emitido sus dos primeras hojas (chapolas), hasta el colino de café que es la planta apta para su trasplante. Esto se logró mediante el diseño y construcción de un invernadero a escala (150 plantas), en el que se hizo uso de sensores que permitan monitorear datos como temperatura y humedad para tomar acciones que permitan alcanzar un ambiente óptimo para el crecimiento de la planta.

Para la validación de lo mencionado y con la finalidad de realizar una comparación, también se ha realizado un almácigo tradicional con una capacidad similar al número de plantas. El prototipo automatizado mostró mejores resultados por encima del tradicional pues permite controlar diferentes variables ambientales, lo que se traduce en robustez, calidad de la planta y ahorro de tiempo. Esta investigación contribuye al introducir, analizar y aplicar nuevas tecnologías, como la automatización en la fase de almácigo en el café, ya que proporciona información para la mejora del cultivo de café, además sirve como apoyo al laboratorio del CITE y beneficia a los productores locales.

El proyecto está relacionado con el diseño y construcción de invernaderos para café, que permitan el monitoreo y control de variables ambientales y de suelo para el desarrollo de plántulas de café, como el uso de la agricultura inteligente utilizando tecnologías IoT, en el que se usó una tarjeta de desarrollo ESP32 vinculada a una plataforma en la nube para la recopilación, visualización y análisis de datos de sensores y dispositivos conectados a Internet como lo es Ubidots. Esta investigación tiene estrecha relación con los siguientes artículos, manuales e investigaciones como:

- “*Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada*” Briceño-Martínez et al., 2020
- “*Diseño e implementación de un prototipo IoT para el monitoreo de parámetros ambientales aplicados a cultivo arroz utilizando ESP32 y Thinkspk*” Mosquera et al., 2022
- “*ALMÁCIGOS DE CAFÉ: Calidad fitosanitaria, manejo y siembra en el campo*” Gaitán et al., 2011
- “*Manual Técnico para la Producción de Café Robusta*” López et al., 2016

El objetivo general que ha guiado a la presente investigación es “Diseñar y construir un prototipo automatizado para almácigo de café de especialidad destinado al laboratorio del CITE.”

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Investigar sobre los almácigos de cafés de especialidad cultivados en el cantón Loja, con el fin de identificar las condiciones ambientales para su desarrollo.
- Diseñar y construir un prototipo automatizado de almácigo de café para el desarrollo de la planta.
- Realizar una comparación de resultados acerca del desarrollo de la plántula de café, entre el almácigo automatizado y un no automatizado.

Este proyecto busca establecer una base metodológica para la tecnificación y automatización en almácigos de café, contribuyendo a obtener plantas saludables, robustas y uniformes optimizando recursos y mejorando la eficacia en la producción. Los alcances del proyecto incluyen la identificación y caracterización de las condiciones ambientales óptimas, la construcción de un prototipo automatizado y la comparación del crecimiento y desarrollo de las plántulas en condiciones automatizadas versus métodos tradicionales.

Las limitaciones en el desarrollo del proyecto incluyen la variabilidad en las condiciones climáticas con picos muy pronunciados, problemas de conectividad WiFi, inversión inicial en sensores y equipos, lo que podría representar una barrera para pequeños pro-

ductores de café. Adicionalmente, el manejo y mantenimiento de sistemas automatizados requiere de capacitación técnica. Estas limitaciones sugieren la necesidad de programas de formación y asistencia técnica para los productores locales y evaluar la escalabilidad y adaptabilidad del prototipo en diversas condiciones.

## 4. Marco Teórico

### 4.1. El cultivo de café en la provincia de Loja

Según Vázquez (2023), el cultivo de café llegó a la provincia hace un poco menos de 200 años, desde entonces la producción ha formado parte de los 15 de los 16 cantones de la provincia en unos más que otros. Esta producción se ve favorecida ya que posee diferentes pisos climáticos y altitudinales, además de la variedad de suelos que se ven asociados a los cultivos de especies productivas frutales de la región como guineo, aguacate, guabo, cítricos, etc. La provincia de Loja ha sido ganadora 10 de las 15 ediciones anteriores al concurso de la Taza Dorada, donde casi siempre ocupa el 75 % de los veinte mejores cafés del Ecuador. En las dos últimas décadas la superficie de cultivo de café ha disminuido drásticamente debido a la baja cotización en el mercado, así como enfermedades que se extendieron por toda la región como la roya, producida por el hongo *Hemileia vastatrix*, esta situación desanimó y dificultó su cultivo por lo que muchos productores dejaron de cultivar o cambiar de cultivo.

Debido a la disminución drástica de cultivo de café, no se puede competir en un mercado de volumen, en base a ello surge la alternativa de reactivar la producción mediante café de especialidad y la provincia de Loja ha empezado nuevamente con el boom del cultivo de café, por lo que la tecnificación es de vital importancia para alcanzar mejor calidad y producción, aunque actualmente hay un 20 % de tecnificación o semi tecnificación los resultados ya se pueden palpar frente a un manejo tradicional del cultivo (Vázquez, 2023).

En la **Figura 1** se muestra los principales cultivos en la provincia de Loja en el año 2022, cabe recalcar que con la tecnificación, mayor cuidado e importancia en el mercado y resiembra de plantas resistentes a la roya, broca, etc, la producción de café a ido aumentando considerablemente en los últimos años.

**Principales Cultivos - 2022**  
Nivel Provincial: LOJA

No.	Producto	Sup Plantadas (ha)	Sup Cosechadas (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)
1	Maíz duro seco	18.674	16.876	61.578	3,65
2	Arroz	11.355	11.313	81.028	7,16
3	Café	4.959	3.630	1.245	0,34
4	Maíz suave seco	3.289	2.847	2.829	0,99
5	Banano	2.873	2.230	38.204	17,13
6	Caña de azúcar	2.338	2.068	214.718	103,84
7	Fréjol seco	2.103	1.649	637	0,39
8	Haba seca	963	745	319	0,43
9	Fréjol tierno	849	547	445	0,81
10	Caña de azúcar para otros ..	815	717	3.423	4,77
11	Maíz suave choclo	786	624	877	1,41
12	Papa	557	537	1.589	2,96
13	Haba tierna	496	247	170	0,69
14	Plátano	442	110	1.491	13,49
15	Maní (Grano Descascarado)	353	347	196	0,56
16	Yuca	268	266	1.809	6,80
17	Maíz duro choclo	238	238	603	2,53
18	Arveja tierna	142	142	166	1,18
19	Cebolla Blanca (Tallo Fresc..	93	93	794	8,50
20	Arveja seca	66	37	10	0,28
21	Limón (Fruta fresca)	53	53	257	4,82

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) – ESPAC.

**Figura 1.** Principales cultivos en la provincia de Loja en el año 2022

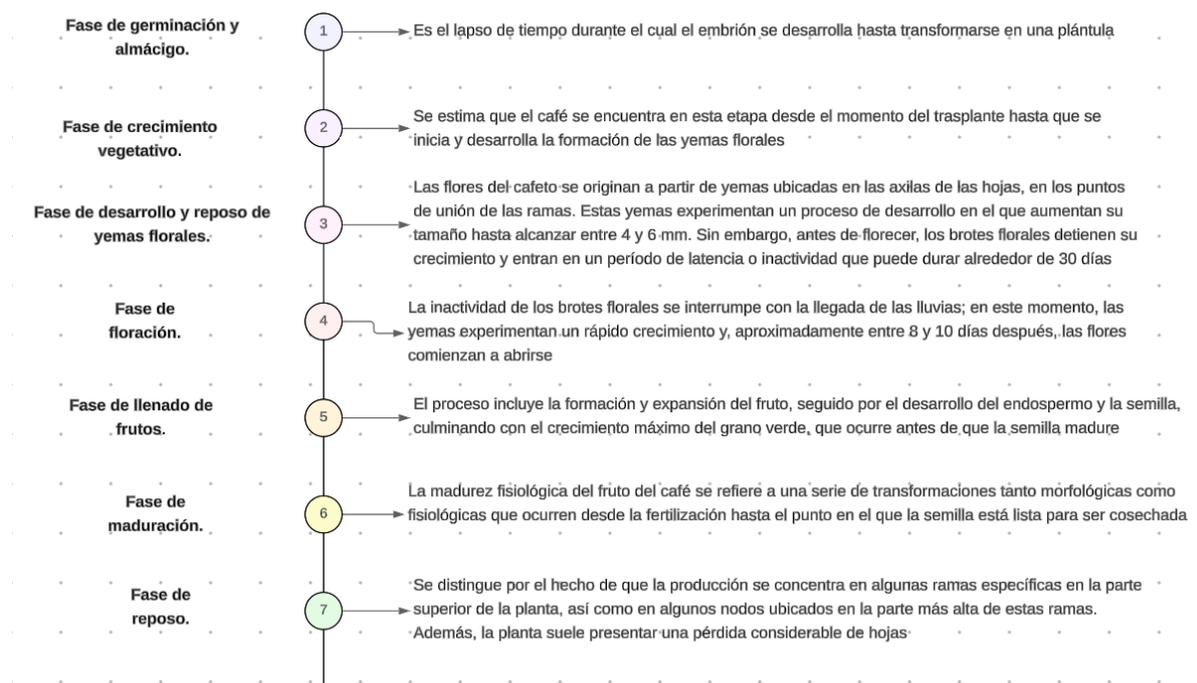
Fuente: Instituto de Estadística y Censos (INEC)- ESPAC

## 4.2. Generalidades del cultivo de café de especialidad

Según la Association (2023) SCA, “El café de especialidad debe puntuarse al menos 80 puntos en una escala de 100 puntos, y debe cumplir con ciertos criterios de calidad, como la ausencia de defectos, un nivel de tueste uniforme y un sabor equilibrado”. Esto se establece luego de someterse a una evaluación sensorial llevada a cabo por catadores certificados, quienes analizan 10 aspectos: fragancia, aroma, sabor, retrogusto, acidez, cuerpo, uniformidad, equilibrio, claridad de la taza y dulzura.

### 4.2.1. Fases fenológicas del café

En la **Figura 2**, se puede diferenciar el ciclo fenológico del café, mismo que se encuentra dividido en siete fases.



**Figura 2.** Fases fenológicas del café

Fuente: Tomado de Vignola et al., 2018.

#### 4.2.2. Fase de germinación y almácigo

La fase de almácigo comienza cuando las plántulas tienen las dos hojas cotiledonares completamente desarrolladas y desplegadas, hasta que se inicia y desarrolla la formación de las yemas florales.

Para la obtención de plantas de café de calidad si se desea conservar las plántulas en el almácigo durante un periodo de hasta 6 meses, se recomienda emplear bolsas de 17 x 23 cm, con una capacidad de alrededor de 2,0 kg. En caso de utilizar bolsas más pequeñas, de 1,0 kg de capacidad, el crecimiento adecuado de las raíces solo se garantiza durante los primeros 4 meses (Gaitán et al., 2011). Aunque también existen otras alternativas como es la elaboración de almácigo de café al suelo y el uso de tubetes.

El sustrato utilizado para llenar las bolsas debe ser de alta calidad, ya que esto es fundamental para garantizar el adecuado desarrollo del sistema de raíces. Se recomienda una textura franco-arenosa, que se logra mediante una mezcla de tierra negra fértil (70%), materia orgánica descompuesta (10% a 20%) y arena (10% a 20%). Todos estos componentes deben ser tamizados con un cedazo de  $\frac{1}{4}$  de pulgada para eliminar posibles obstáculos que puedan interferir con el crecimiento de las raíces. La colocación de las bolsas se puede ordenar en doble hilera con calles de 40 a 50 cm de ancho con el fin de obtener buena penetración de luz y facilitar el cuidado de la planta (López et al., 2016).

No se recomienda sembrar materiales en estado de fósforo, ya que no se puede

hacer un buen control en la selección de la chapola, además son susceptibles al ataque de *R. solani* lo que conlleva pérdidas. Los costos en la producción de un almácigo son mayores que en el germinador, y es fundamental para el futuro del cultivo producir plantas con una condición sanitaria óptima, cuyo objetivo es garantizar mayor crecimiento, robustez y desarrollo de la planta (Gaitán et al., 2011). En la **Figura 3** se aprecia la etapa de estudio que va desde la chapola hasta el colino de café apto para su trasplante.



**Figura 3.** Desarrollo de la plántula de café.

Fuente: Tomado de George, 2022.

El manejo fitosanitario es crucial en el cultivo de café ya que permite el control de enfermedades, nemátodos, mancha de hierro, roya del cafeto, muerte descendente, cochinillas harinosas, etc. En base a ello se debe buscar alternativas para el control químico de enfermedades y plagas (Gaitán et al., 2011).

El riego es fundamental para obtener plantas de almácigo de buena calidad, dependerá de las condiciones climáticas del lugar, así como el nivel de sombreado en el almácigo que debe ajustarse en función de las condiciones climáticas, siendo necesario reducirlo en caso de que haya una mayor humedad debido a la lluvia. Por otro lado, la fertilización garantiza calidad en las plántulas de café por lo que un buen programa de fertilización nos asegura la complementación de nutrientes como nitrógeno, fósforo, hierro, calcio, magnesio, etc. El control de malezas se lo puede realizar de forma manual o química donde el control manual es más seguro, pero más costoso (López et al., 2016).

#### **4.2.3. Variedades de café de especialidad en la provincia de Loja**

En los cantones cafetaleros de la provincia de Loja se cultivan variedades como típica, geisha, bourbon, sidra y caturra. Aproximadamente el veinte por ciento del café Arábica del país proviene de esta región, es aquí donde se centra la atención del sector de cafés especiales, esto debido a las diferentes características climáticas y de los suelos para

el cultivo de café de altura. Sin embargo, esta zona es vulnerable a condiciones climáticas adversas. En la provincia se llega hasta cultivos de 2100 msnm y su temporada de cosecha es en junio-septiembre (TurismoEC, 2022).

#### **4.2.4. Condiciones meteorológicas óptimas para el cultivo de café**

El cultivo de café se desarrolla de manera más efectiva en regiones situadas entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. Esta área, conocida como el cinturón del café, abarca altitudes que oscilan entre 800 y 2.000 metros (Axel, 2022). A continuación, se muestra algunas condiciones más importantes que favorecen el cultivo de café.

**4.2.4.1 Clima** El clima predominante es tropical y ecuatorial, caracterizado por una humedad constante a lo largo del año, que oscila entre el 60 % y el 80 % (Axel, 2022).

**4.2.4.2 Precipitación** La adecuada de precipitación para el cultivo se sitúa entre 1.500 y 2.000 milímetros al año, lo que equivale aproximadamente a unos 125 milímetros por mes. Un exceso de lluvia puede tener efectos negativos en el proceso de floración de los cafetales (Axel, 2022).

**4.2.4.3 Temperatura** La banda ideal para cultivar café arábico está en un rango de temperatura entre 18 y 22°C, mientras que para la variedad robusta se sitúa entre 22 y 26°C. En zonas de clima frío, con temperaturas por debajo de los 18°C, las diferentes variedades de café tienen un crecimiento más limitado y su producción disminuye. Por otro lado, en climas cálidos, con temperaturas que superan los 25°C de media, el cultivo puede ser más vulnerable a la proliferación de plagas (Axel, 2022).

**4.2.4.4 Exposición Solar** Se recomienda que el cultivo de café reciba alrededor de 1.800 horas de luz solar al año. Es importante no exceder esta cantidad, ya que podría afectar negativamente al crecimiento de las plantas y provocar una maduración más rápida de los frutos, lo cual tendría un impacto negativo en la calidad del café (Axel, 2022).

A continuación, en la **Tabla 1**. Se muestra algunas características óptimas para el desarrollo del cultivo del café, mismas que se han conseguido de una investigación tipo documental y no experimental.

**Tabla 1.** Características óptimas para el desarrollo del cultivo de café en Ecuador.

<b>Características óptimas para el desarrollo de un cafetal.</b>	
Altitud	La altitud óptima se localiza entre los 1.200 y 1.700 msnm, aunque en Ecuador se han llegado a establecer desde los 300 msnm y por encima de los 1.700 msnm con buenos rendimientos.
Temperatura	Entre los 15 y 26°C.
Precipitaciones	El rango de precipitaciones óptimas para el cultivo del café puede variar de 1.000 a 3.000 mm.
Humedad relativa	En torno al 70-85%
Viento	El umbral para no producir daños físicos ni fisiológicos al café es de 20 a 30 km/hora.
Topografía	Se adapta con facilidad a condiciones topográficas desfavorables, aunque los terrenos ligeramente ondulados y planos son mejores para este cultivo. Propiedades físicas: La textura adecuada para el cafetal es media o limosa, con estructura granular. La profundidad efectiva debe ser mayor a 50 cm.
Características físico-químicas	Propiedades químicas: El rango de pH óptimo se encuentra entre 5,5 y 6,5. El porcentaje de materia orgánica se debe encontrar entre 2-5 %, y el de Nitrógeno superior al 3 % para el desarrollo adecuado del café. Las condiciones óptimas en cuanto a macronutrientes para este cultivo son de 0,2-0,7 (meq/100gr) en el caso del potasio y 6-14 (ppm) en el caso del fósforo.

Fuente: Venegas et al., 2018.

### 4.3. Invernaderos para cultivo de café

Los invernaderos posibilitan la creación de entornos propicios para el cultivo de plantas, lo que resulta en una mayor producción y una reducción del espacio necesario para el cultivo. Asimismo, ayudan a mitigar los daños y pérdidas causados por factores externos o variaciones climáticas. Estos invernaderos suelen variar en sus estructuras, cubiertas, cortinas, puertas y sistemas de riego (Solocafé, 2021).

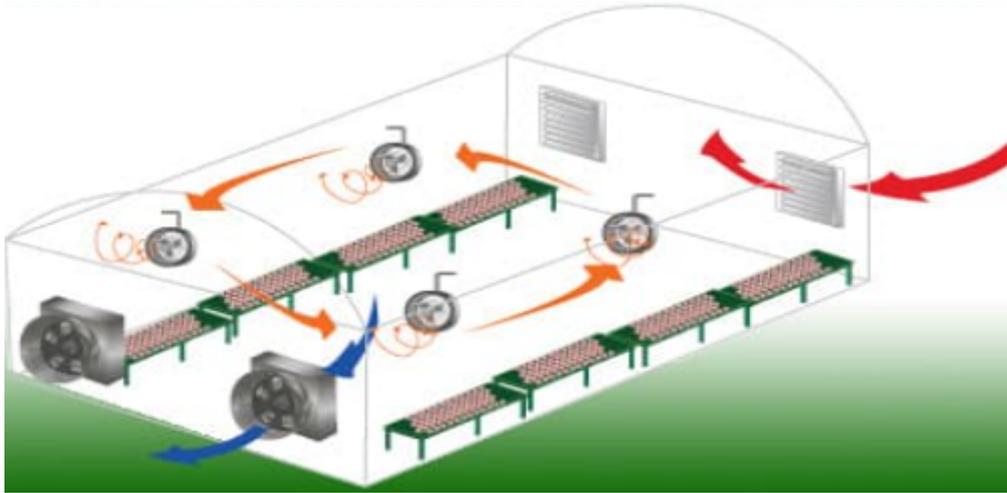
#### 4.3.1. Características generales de los invernaderos

**4.3.1.1 Cubierta de material traslúcido** La parte superior está compuesta de un material que permite el paso de la luz. Los modelos más costosos y duraderos generalmente emplean vidrio o policarbonato, mientras que los más comunes suelen utilizar plástico transparente para invernaderos, el cual incluye protección UV, dispersión de luz, características antigoteo, etc. (Hernández, 2024).

**4.3.1.2 Estructura** La estructura debe ser de material suficientemente fuerte para el soporte de la cubierta y condiciones climáticas (Hernández, 2024).

**4.3.1.3 Ventilación** El sistema de ventilación puede estar diseñado con paredes de malla agrícola en el caso más básico o una cortina de plástico agrícola que se pueda desplazarse según las temperaturas con el fin de evitar el sobrecalentamiento de las plantas

y la acumulación de humedad. También se puede emplear ventiladores y/o extractores que dependerán de la dimensión del invernadero y recursos (Hernández, 2024). En la **Figura 4** se aprecia la ventilación en un invernadero.



**Figura 4.** Ventilación en invernaderos.

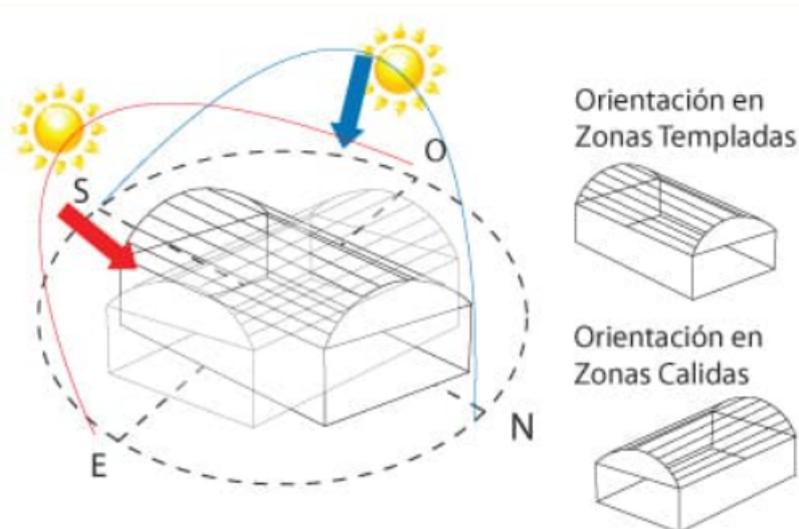
Fuente: Tomado de Hernández, 2024.

**4.3.1.4 Control de temperatura y humedad** Para regular la temperatura en invernaderos, comúnmente se emplean ventiladores y cortinas para reducir el calor, aunque ahora se está implementando la tecnología de “paredes húmedas”, más eficaz en este aspecto. En épocas de bajas temperaturas, se recurre a cortinas, calefactores y sistemas de calefacción radiante, como suelos y tuberías (Hernández, 2024).

Para Hernández (2024), el nivel de humedad en invernaderos suele mantenerse entre un 50 % y un 70 %, un factor crítico para la salud de las plantas. Un exceso de humedad puede estimular la proliferación de enfermedades causadas por hongos y otros inconvenientes, mientras que una escasez de humedad puede generar estrés en las plantas y perjudicar su desarrollo. Para monitorear la humedad, se recomienda el uso de un termo-higrómetro, complementado con nebulizadores para controlarla eficazmente.

**4.3.1.5 Sistema de riego** Su función es suministrar la adecuada cantidad de agua para el tipo de plantas que se está cultivando (Hernández, 2024).

Las características y diseño del invernadero se determinarán según las condiciones climáticas, que incluyen temperatura, exposición solar, precipitaciones, dirección del viento y topografía del lugar. De acuerdo con estos factores, se define la orientación de la estructura, la cual puede ser de oeste a este, como se ilustra en la **Figura 5**

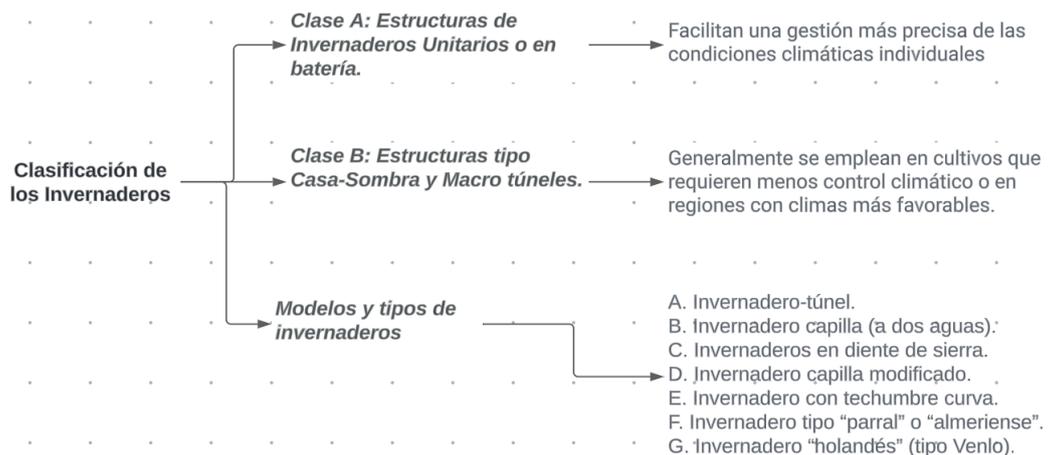


**Figura 5.** Orientación de invernaderos.

Fuente: Tomado de Hernández, 2024.

#### 4.3.2. Modelos y tipos de invernaderos

Según Hernández (2024), los invernaderos se pueden clasificar de diversas formas, dependiendo de las características de sus componentes de construcción. La estructura de un invernadero está influenciada por varios factores como el tipo de suelo, la topografía, los vientos, las necesidades bioclimáticas de las plantas cultivadas, el clima de la región, la mano de obra disponible y las consideraciones económicas. En la **Figura 6** se presenta una clasificación de los invernaderos.



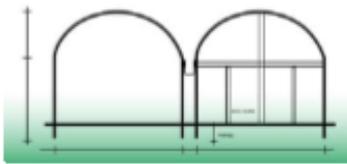
**Figura 6.** Clasificación de invernaderos.

Fuente: Tomado de Hernández, 2024.

A continuación en las **Figuras 7 y 8** se presentan algunas características, ventajas y desventajas de los diferentes tipos y modelos de invernaderos.

## Modelos y tipos de invernaderos

### A. Invernadero-túnel.



Estos invernaderos presentan dimensiones variables en cuanto a su anchura y altura

Ofrece una gran resistencia a los vientos y se instala con facilidad. Proporciona una excelente transmisión de luz solar y es compatible tanto con materiales de cubierta flexibles como rígidos.

Presenta un volumen de aire retenido relativamente reducido, lo que implica una baja inercia térmica y propicia la ocurrencia del fenómeno de inversión térmica.

### B. Invernadero capilla (a dos aguas).

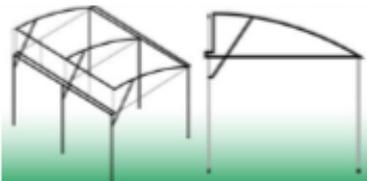


La inclinación del techo puede ajustarse según la radiación solar y las precipitaciones, típicamente oscilando entre 15° y 35°.

La construcción es relativamente sencilla y económica, utilizando materiales disponibles localmente como madera. Puede emplear tanto materiales de cubierta flexibles como rígidos.

Los invernaderos en batería presentan dificultades de ventilación debido a su diseño con altura uniforme y menor volumen interno. Además, tienen más elementos estructurales que reducen la entrada de luz solar.

### C. Invernaderos en diente de sierra.



El ensamblaje lateral de estos invernaderos resulta en la formación de los característicos "dientes de sierra". Para facilitar el drenaje del agua de lluvia, se ha incorporado una inclinación en las áreas de recolección, que se extiende desde el centro hacia ambos extremos.

La construcción es compleja, pero garantiza una excelente ventilación.

El sombreado es más pronunciado que en los invernaderos en forma de capilla debido a la mayor cantidad de elementos presentes.

### D. Invernadero capilla modificado.

La construcción es moderadamente compleja pero ofrece una excelente ventilación, gracias a la disposición en baterías.

La presencia de más elementos estructurales resulta en una mayor capacidad de sombreado en comparación con otros diseños, aunque es menor que la capacidad de sombreado del tipo sierra. Los elementos de soporte pueden dificultar el desplazamiento y la disposición de los cultivos.

Figura 7. a) Modelos y tipos de invernaderos

Fuente: Obtenido de Hernández, 2024.



**Figura 8. b)** Modelos y tipos de invernaderos.

Fuente: Obtenido de Hernández, 2024.

### 4.3.3. Tipos de riego

Un adecuado suministro de agua permite mantener los suelos debidamente humedecidos hasta la profundidad requerida por los cultivos, lo que asegura un crecimiento óptimo en el tiempo previsto. Este aspecto es relevante en invernaderos, donde la gestión eficiente del riego es fundamental para maximizar la productividad y la calidad de los cultivos. Un sistema de riego bien diseñado y controlado puede contribuir significativamente a este objetivo (Jacto, 2020).

**4.3.3.1 Riego por aspersión.** Este sistema de riego utiliza aspersores distribuidos en la superficie del terreno, estos operan bajo presión, generando gotas de diversos tamaños, emulando la acción de la lluvia. Este método posee una eficacia del 85 %, es adecuado para cubrir grandes extensiones de terreno y es ampliamente utilizado como método de

riego convencional (Jacto, 2020).

**4.3.3.2 Riego por goteo.** Este sistema suministra agua mediante pequeñas gotas y de forma continua a través de sistemas de tuberías y perforaciones mínimas llamados goteros. Es ideal en zonas áridas, ya que optimiza el uso del agua y fertilizantes lo que ofrece una eficiencia del 95 %. Además favorece un crecimiento adecuado de las raíces, tiene bajo consumo de agua y alta eficiencia. Existen tres tipos de riego por goteo: en línea, estándar y regulable (Jacto, 2020).

**4.3.3.3 Riego por micro-aspersión.** Este sistema de riego requiere un flujo menor de agua, adecuado en cultivos que no necesitan un riego intensivo. Tiene una eficiencia del 90 %, con excelente opción para terrenos con pendientes o colinas. Además, permite la dosificación del agua y la incorporación de fertilizantes y pesticidas.(Jacto, 2020).

**4.3.3.4 Riego hidropónico.** Es uno de los métodos mas eficientes pues utiliza el agua como medio para suministrar nutrientes directamente a las raíces. Su implementación es compleja debido a la necesidad de incorporar nutrientes y productos químicos en el agua, pero sus ventajas son bajo consumo de agua, eficiencia del 95 %, reducción en el uso de abonos y fertilizantes y aumento en los rendimientos por metro cuadrado (Jacto, 2020).

**4.3.3.5 Riego por nebulización.** Este método se enfoca en atomizar el agua, para enfriar el ambiente al evaporarse. Su propósito principal es reducir las altas temperaturas, como invernaderos y viveros, al tiempo que proporciona la humedad para las plantas, posee una eficiencia del 90 %, facilidad de instalación, posibilidad de programación, mantenimiento de la humedad y bajo consumo de energía (Jacto, 2020).

**4.3.3.6 Riego por gravedad.** Es uno de los métodos más comunes, consiste en dirigir el agua a través de canales o surcos con una ligera pendiente, asegurando su distribución e infiltración en el suelo para llegar a los cultivos y saturarlos. Es una opción económica, alcanza una eficiencia del 55 %, independencia de la energía y una menor susceptibilidad a la interferencia del viento en la distribución del agua. (Jacto, 2020).

#### **4.4. Agricultura 4.0**

La Agricultura 4.0 se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de sensores montados y distribuidos en una superficie agrícola. Estos datos se envían a través de internet para facilitar la toma de decisiones, ya sea en tiempo real o en un tiempo posterior. Se puede describir como la implementación del big data en el ámbito agrícola, respaldado por la captura y transmisión de datos en tiempo real. Este enfoque busca mejorar la calidad de los cultivos y reducir el impacto ambiental (Valenzuela et al., 2023).

## 4.5. Sensores, actuadores y controladores para el control de un almácigo de café

En el contexto de la agricultura 4.0, la introducción de sensores, actuadores y controladores revoluciona la forma en que se gestiona el cultivo de café, incluso en su fase inicial como los almácigos. Ya que aprovecha la conectividad y la automatización para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso pues permite monitorear y regular aspectos críticos como la temperatura, la humedad, ventilación y la iluminación, optimizando las condiciones para el crecimiento de las plantas (Valenzuela et al., 2023).

### 4.5.1. Fuente de alimentación.

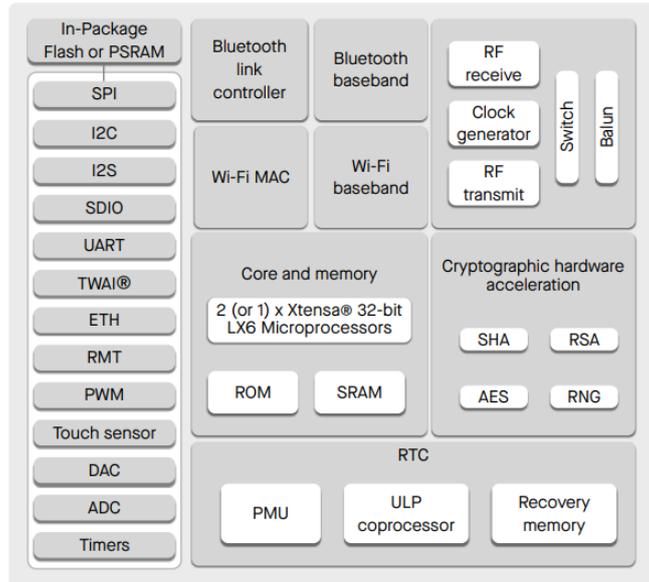
Una fuente de alimentación es un elemento eléctrico cuyo propósito es suministrar energía eléctrica a un aparato, cumpliendo con parámetros como voltaje, corriente y la frecuencia sean los adecuados. Estas fuentes de alimentación pueden actuar como convertidores de energía. En la mayoría de los dispositivos electrónicos, se utilizan varios voltajes estándar, como 24V, 12V, 5V, 3.3V, 1.8V y 1.2V en corriente continua. (Alonso, 2024).

### 4.5.2. Sensor de temperatura humedad relativa DHT22

El módulo sensor DHT22 es una solución económica y efectiva para medir la temperatura y humedad relativa de forma digital. Este sensor consta de un componente capacitivo para la humedad y un termistor que evalúa la temperatura del ambiente. La información recopilada se transmite de forma digital a través de un pin específico. (ELECTRONICS, s.f.). En la **Tabla 20** se muestran una serie de especificaciones técnicas acerca de este sensor.

### 4.5.3. Tarjeta de desarrollo ESP32

La tarjeta de desarrollo está basada es un microcontrolador ESP32 (WROOM32) diseñado por la compañía Espressif Systems, es ideal para aplicaciones IoT debido a su bajo consumo de energía, posee un diseño robusto capaz de operar de forma fiable en entornos semi-industriales mejorando su diseño, posee un rango de temperatura de funcionamiento que va desde -40 °C y +125 °C, puede manejar protocolos Wifi y Bluetooth (Espressif Systems, 2024). En la **Figura 9** se muestran algunas características del SoC ESP32.



**Figura 9.** Diagrama de bloques del SoC ESP32

Fuente: Tomado de Espressif-Systems, 2024.

#### 4.5.4. *Bomba de diafragma de alta presión 12V*

Es un dispositivo diseñado para aplicaciones donde se necesite un flujo o presión controlado de fluidos. Suele destacarse por su tamaño reducido, consumo eléctrico bajo y funcionamiento silencioso. Las bombas de diafragma cuentan con un motor interno sin escobillas, lo que garantiza una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento. Suelen ser utilizados en riegos automatizados, dosificación, control de nivel, en acuarios, etc. Además, su control es sencillo mediante un microcontrolador y un driver de potencia (ELECTRONICS, s.f.) En la **Tabla 22** se muestran algunas características de una bomba de diafragma pequeña.

#### 4.5.5. *Ventilador axial impermeable*

Los ventiladores axiales Sotop ofrece una excelente disipación de calor, cuenta con hojas metálicas resistentes a la oxidación además de ayudar a bloquear las ondas electromagnéticas entrantes. (SIAU, 2024). En la **Figura 10** se puede apreciar el modelo de un ventilador axial con IP55, con un caudal de 120 CFM.



**Figura 10.** Especificaciones del ventilador axial  
Fuente: Tomado de SIAU, 2024.

**4.5.6. Lámparas led para cultivo**

Las lámparas led de espectro completo que abarca desde la ultravioleta hasta el infrarrojo, las hace ideales para estimular procesos fisiológicos en las plantas como la fotosíntesis y el crecimiento vegetal, mientras que la luz roja es importante para la floración y la producción de frutos (Gámez, 2023).

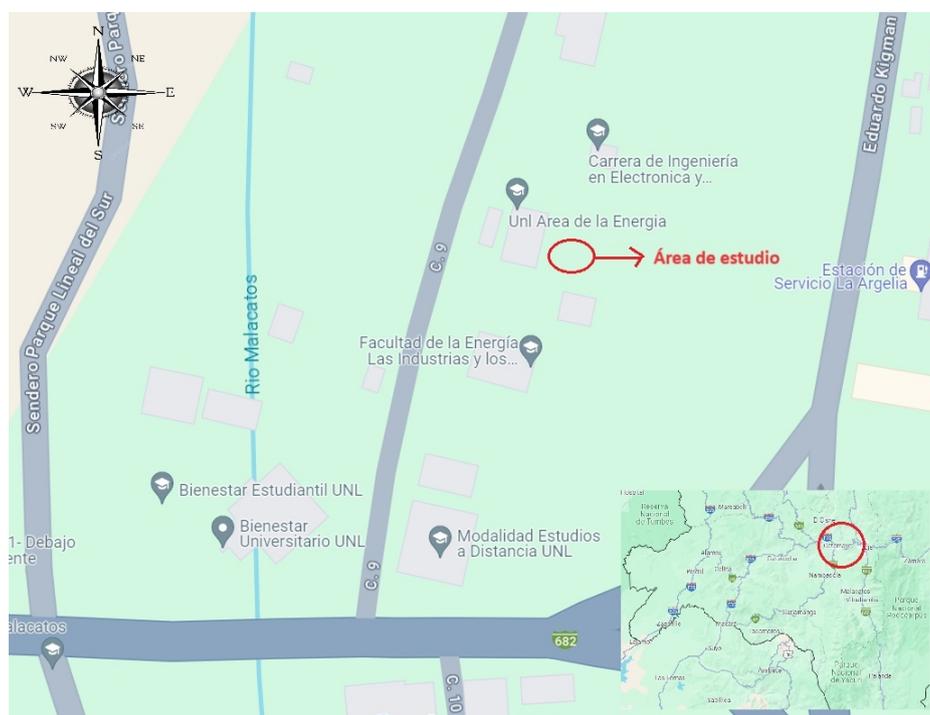
**4.6. Beneficios de la automatización de invernaderos para café.**

La agricultura inteligente o agricultura 4.0 proporciona beneficios significativos en la agricultura, como la capacidad de recopilar y procesar datos de forma rápida, mejorar la precisión, aumentar la eficiencia de la producción y reducir los costos operativos y la dependencia de la mano de obra (Cherlinka, 2022).

## 5. Metodología

### 5.1. Área de estudio

El proyecto de investigación que involucra el diseño y construcción del prototipo automatizado y no automatizado para almácigo de café de especialidad, se encuentra ubicado en el barrio la Argelia al sur de la ciudad de Loja en las instalaciones de la Universidad Nacional de Loja en la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, en la calle C. 9 en la coordenada geográfica  $4^{\circ}1'55''$  Sur,  $79^{\circ}12'0,5''$  Oeste. En la **Figura 11** se muestra un mapa en el que se detalla la ubicación del área de estudio.



**Figura 11.** Ubicación del área de estudio

Para el desarrollo del trabajo de investigación, se seleccionó una muestra de 300 chapolas de café de la variedad arábica de porte bajo, específicamente la variedad Sarchimor, conocida por su resistencia a la roya. Las chapolas fueron tomadas de un almácigo de café por conveniencia, es decir revisando que cumplieran con criterios de calidad fitosanitaria. El vivero, compuesto por 10,000 plántulas, está ubicado en el cantón Olmedo y pertenece a Rafael Armijos Carrión y Carlos Armijos Carrión. Ellos desarrollaron almácigos de café durante seis años, utilizando conocimientos y técnicas empíricas.

Los principales materiales, equipos y recursos que se emplearon para la ejecución del proyecto de investigación son los siguientes:

#### **Materiales de oficina y tecnológicos**

- Computadora.
- Smartphone.
- Internet.
- Recursos bibliográficos.
- Paquete de Microsoft Office.
- AutoCAD (versión estudiantil).
- Arduino IDE.
- Ubidots.

### **Materiales, equipos y utensilios de campo**

- Madera de pino o ciprés.
- Plástico para invernadero.
- Malla galvanizada.
- Materiales de sujeción.
- Malla sarán - polisombra.
- Geomebrana.
- Sensores de temperatura y humedad.
- Ventilador axial.
- Luz led de espectro para plantas.
- Niquelina.
- Sistema de riego: atomización de rociador ajustable.
- Minibomba de diafragma de alta presión.
- Conductor eléctrico THHN 12 AWG.
- Manguera para agua de 1/2 in.
- Multímetro digital TES 10125.

## **5.2. Procedimiento**

La presente investigación, enfocada en el diseño y construcción de un prototipo automatizado para almácigo de café adoptó un enfoque metodológico mixto, se empleó herramientas cualitativas para la revisión bibliográfica acerca de la producción de café de especialidad, variedades de café cultivadas, caracterizar las condiciones edafoclimáticas óptimas para el cultivo y las características de los viveros de café desarrollados en la provincia. Por otro lado, las técnicas cuantitativas permitieron la identificación, medición y monitoreo de las variables relevantes para el diseño y construcción del prototipo, que permitan adecuar un microclima óptimo para el desarrollo del almácigo del café.

El diseño de la investigación fue de tipo aplicado, es decir evaluó la eficacia del prototipo automatizado frente a un tradicional con la finalidad de comparar el desarrollo del colino de café en un tiempo establecido. La selección de muestras fue probabilística por conveniencia, considerando el tamaño de la población, el nivel de confiabilidad y el margen de error, con la elección de los elementos de la muestra realizada al azar.

### **5.2.1. Objetivo específico 1**

- **Investigar sobre los almácigos de cafés de especialidad cultivados en el cantón Loja, con el fin de identificar las condiciones ambientales para su desarrollo.**

Para alcanzar el primer objetivo, se siguió el siguiente proceso.

- Exploración bibliográfica sobre la producción de café en el Ecuador, haciendo énfasis en la provincia de Loja, con el objetivo de comprender la importancia de este cultivo en la región.
- Comprender la problemática en la producción de café y valorar la importancia que ha tomado la tecnificación o semi-tecnificación en los procesos de producción para su reactivación.
- Investigación centrada en la etapa de almácigo mediante revisión literaria y de campo como: MAGAP, CENICAFÉ, Vivero de la prefectura de Loja y viveros del cantón Olmedo, haciendo énfasis en las variedades de café cultivadas, evaluando su adaptabilidad y características en esta etapa.
- Identificación de las condiciones edafoclimáticas necesarias para el desarrollo óptimo del café de especialidad como tipo de suelo, altitud, temperatura, humedad y nutrientes a través de fuentes científicas y datos empíricos.

### *5.2.2. Objetivo específico 2*

- **Diseñar y construir un prototipo automatizado de almácigo de café para el desarrollo de la planta.**
  - Investigación bibliográfica sobre materiales, estructuras, dimensiones y categorías sobre invernaderos, así mismo, recopilación de información de campo en invernaderos de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables y del cantón Olmedo.
  - Análisis de sensores, actuadores y controladores adecuados para el prototipo de almácigo para 150 plantas, en el que se pueda implementar un protocolo de comunicación con conexión a Internet.
  - Diseño y construcción de un prototipo automatizado en el que se incorpore elementos necesarios para optimizar el crecimiento de las plantas. Paralelamente se construyó un almácigo tradicional que permitió evaluar y comparar el rendimiento y desarrollo en los dos sistemas.
  - Verificación y ajuste del funcionamiento de los dos sistemas, asegurando la correcta operación de los sistemas antes de su fase comparativa.

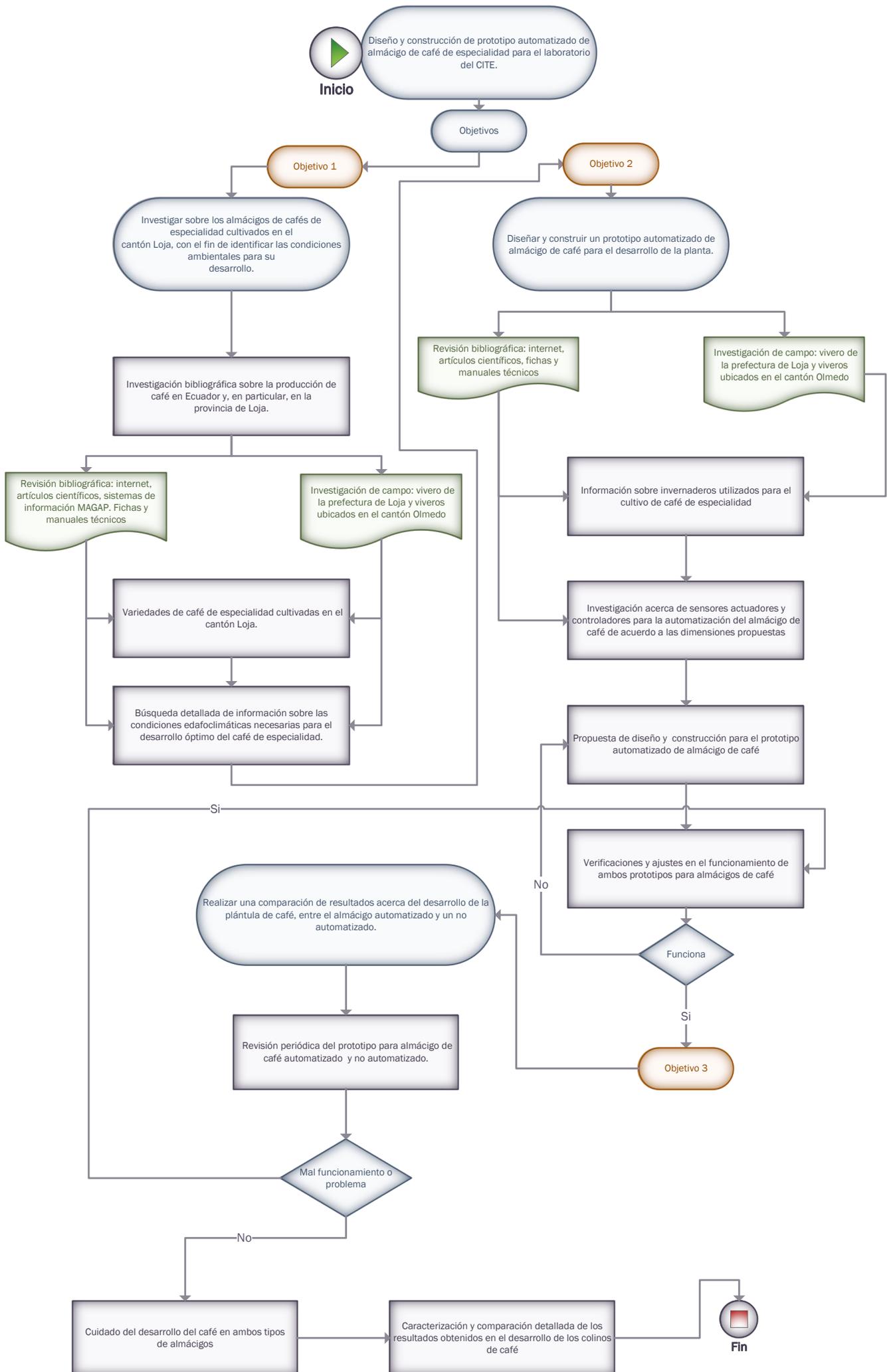
### *5.2.3. Objetivo específico 3*

- **Realizar una comparación de resultados acerca del desarrollo de la plántula de café, entre el almácigo automatizado y uno no automatizado.**
  - Monitoreo periódico en los sistemas para evaluar su desarrollo, identificar posibles problemas en el funcionamiento y realizar los ajustes necesarios.
  - Supervisión constante en el desarrollo de las plantas, asegurando prácticas agrí-

colas apropiadas para el crecimiento saludable de las plantas.

- Caracterización y comparación de indicadores de crecimiento y salud de las plantas como tasa de crecimiento, incidencia de enfermedades, altura de la planta, diámetro de copa de las hojas y calidad general de las plantas. Esta evaluación permitió verificar las ventajas de la automatización en los almácigos de café.

El flujograma que se presenta a continuación, ilustra los pasos metodológicos para cumplir con el diseño y construcción de un prototipo automatizado para almácigo de café de especialidad



### 5.3. Procesamiento y análisis de datos

#### 5.3.1. Tamaño de muestra

Para calcular el tamaño de la muestra se hizo uso de la ecuación 1

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

Donde:

- n = Tamaño de muestra buscado
- N = Tamaño de población o Universo
- Z = Parámetro estadístico que depende el nivel de confianza (NC)
- e = error de estimación máximo aceptado
- p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)
- q = (1-p) = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

Nivel de confianza 95 % Puntuación Z = 1.96

Población 10000 chapolas de café

Error del 5.6 %

$$n = \frac{10000 * 1,96^2 * 50 * 50}{5,6^2 * (10000 - 1) + 1,96^2 * 50 * 50} = 297,2 \approx 298$$

Entonces para el tamaño de la muestra para el estudio entre el almácigo automatizado y no automatizado se cogió una muestra de 300 chapolas de café de variedad Sarchimor.

#### 5.3.2. Cálculo de la potencia requerida para el calentamiento del almácigo de café de especialidad

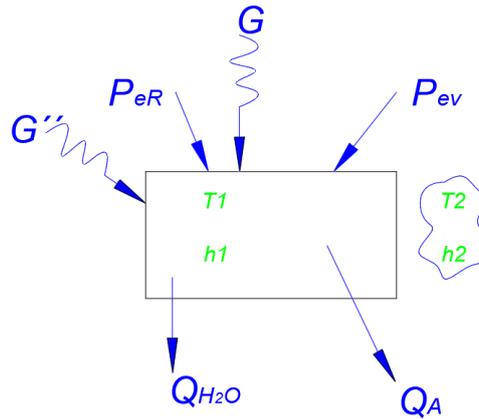
**Datos:**

- T1 = 22 °C
- T2 = 17 °C
- $Pot_{lamp} = 1000 \text{ W}$
- $Pot - elec_{vent} = 15 \text{ W}$
- $A = 0.9\text{m} * 1.15\text{m} = 1,035 \text{ m}^2$
- h = 0,66 m

**Balance energético** El balance energético en un sistema se describe como la energía de entrada es igual a la energía de salida, (Véase la ecuación 2)

$$E_{entrada} = E_{salida} \quad (2)$$

$$Pe_R + Pe_V + P_{lamp} + G'' = Q_A + q + Q_{H_2O}$$



**Figura 12.** Circuito térmico equivalente del invernadero.

El valor de la absorptividad del plástico para invernadero de 200  $\mu\text{m}$  es de  $\alpha = 0,875$  y la radiación solar global promedio para estos meses de investigación es  $G'' = 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

$$G = \alpha * G'' * A = 0,875 * 300 \text{W/m}^2 * 1,035 \text{m}^2 = 271,68 \text{ W}$$

$$V = A * h = 1,035 \text{m}^2 * 0,66 \text{m} = 0,683 \text{ m}^3$$

Tiempo = 5 min = 300 s

$$m = 1,205 * 0,6831 \text{m}^3 = 0,823 \text{ kg}$$

$$M_{\text{aire}} = \frac{m}{t} = \frac{0,8231 \text{kg}}{300 \text{s}} = 2,74 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

El calor específico a presión constante del aire es:

- $C_p = 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- $T_f = 22 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_i = 17 \text{ }^\circ\text{C}$

Calor específico del aire

$$Q_{\text{aire}} = M_{\text{aire}} * C_p * (T_f - T_i) = 2,74 \text{E}^{-3} \text{kg/s} * 1007 \text{J/kg} * \text{K} * (22 - 17) \text{C} = 13,81 \text{ W}$$

El volumen de agua necesario para el riego de almácigos de café es de 4 litros por metro cuadrado por semana.

$$V_{\text{agua}} = 4 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 * \text{semana}}$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{4 * A}{7 \text{días}} = 0,5914 \frac{\text{l}}{\text{día-riego}}$$

Este volumen de agua se propone ser administrado en la mañana y en la noche es decir se ocupará 0.296 litros.

**Bomba:** Para el riego de este volumen de agua se propone hacerlo en un tiempo de 5 segundos. Entonces;

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,296l}{5s} = 0,0592 \frac{l}{s} = 3,552 \frac{l}{min}$$

### Datos para la parte térmica

- $Q1 = 0,0000592 \text{ m}^3/s$
- $\rho_{H2O} = 996 \text{ kg/m}^3$
- $t_t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$
- $Cp = 4183 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

$$\rho_{H2O} = \frac{m}{V}$$

$$m = Q1 * \rho_{H2O} = 0,059 \text{ kg}$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t_t} = 0,0002 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} * Cp * \delta t$$

$$\dot{Q} = 0,0002 \text{ kg/s} * 4183 \text{ J/kg} * K * (22 - 17) = 4,11 \text{ W}$$

### 5.3.2.1 Pared lateral plana externa

Datos:

$$\text{Velocidad} = 2 \text{ m/s}$$

$$\text{Longitud} = 1,15 \text{ m}$$

$$\text{Gravedad} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Espesor}_{\text{plástico}} = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\text{Temp. } T_1 = 22^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. } T_2 = 17^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. } T_a = 22^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. } T_b = 22^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{plástico}} = 0,35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

Una vez con los datos establecidos, calculamos Tf.

$$Tf = \frac{Tb + T2}{2} = \frac{19 + 17^\circ\text{C}}{2} = 18^\circ\text{C} = 291 \text{ K}$$

$$\beta = \frac{1}{291 \text{ K}} = 0,00343$$

En base a la temperatura Tf de 18 °C, se toma los datos de las propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atmósfera (interpolación) de la tabla A-15 de (Çengel & Ghajar,

2011). (Véase la **Tabla 2**)

**Tabla 2.** Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 18 °C.

Propiedades termofísicas del aire a 18 °C	Valor	Unidad
$\rho$	1,212	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	1007	J/kg·K
$\nu$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s
$K$	$2,50 \cdot 10^{-2}$	W/m·K
$Pr$	$7,32 \cdot 10^{-1}$	-

Fuente: Tomado de Çengel y Ghajar, 2011.

Para calcular la convección en la pared plana externa, se calcula el número de Reynolds.

$$Re_L = \frac{v * L}{\nu} = \frac{2m/s * 1,15m}{1,5 * 10^{-5}m^2/s} = 1,53 * 10^5$$

El número de Reynolds crítico para el inicio de la turbulencia en flujo externo es  $Re = 5 * 10^5$ , por lo que se concluye que no es turbulento.

Seguidamente, se calcula el número de Grashof

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_b - T_2) * L^3}{\nu^2} = \frac{9,81m/s^2 * 0,00343 * (19 - 17^\circ C) * 1,15^3m}{1,50 * 10^{-5}m^2/s} = 4,57 * 10^8$$

Para Çengel y Ghajar, 2011, la Relación entre la convección forzada y la convección libre: si  $Gr_L/Re_L^2 \ll 1$ , la convección libre se desprecia frente a la forzada; si  $Gr_L/Re_L^2 \gg 1$ , la forzada se desprecia frente a la libre ". En base a ello se calcula la relación.

$$\text{Relación} = \frac{Gr_L}{Re_L^2} = \frac{4,57 * 10^8}{(1,54 * 10^5)^2} = 1,94 * 10^{-2}$$

Por lo tanto, es convección forzada externa.

“Correlación de convección promedio para el flujo laminar sobre una placa plana con temperatura superficial constante:  $Nu_L = \frac{h_L * L}{k} = 0,664 Re_L^{1/2} * Pr^{1/3}$ . Con propiedades a  $T_f$  y  $Pr \geq 0,6$ ” (Çengel & Ghajar, 2011)

$$Nu_L = 0,664 * (1,53 * 10^5)^{1/2} * (7,32 * 10^{-1})^{1/3} = 2,35 * 10^2$$

Se cumple.

$$h_2 = \frac{Nu * k}{L} = \frac{2,35 * 10^2 * 2,5 * 10^{-2} \frac{W}{m \cdot K}}{1,15 m} = 5,11 \frac{W}{m^2 * K}$$

**5.3.2.2 Pared plana interna** Para medir la velocidad del aire dentro del invernadero cuando un ventilador se encuentra accionado se utilizó un anemómetro Kestrel 4500NV Electronic Hand Held Weather (Ver anexo, **Figura 60**), en la que dicha velocidad se encuentra alrededor de 0.4-0.5 m/s, siendo muy baja por lo que se puede despreciar la convección forzada.

$$Tf = \frac{Ta + T1}{2} = \frac{20 + 22^{\circ}C}{2} = 21^{\circ}C$$

$$\beta = \frac{1}{Tf} = \frac{1}{294 \text{ K}} = 0,00340136$$

De la tabla A-15 de Çengel y Ghajar, 2011 interpolamos para encontrar las propiedades del aire a presión de 1 atm a 21°C. (Véase la **Tabla 3**)

**Tabla 3.** Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 21 °C.

Propiedades termofísicas del aire a 21 °C	Valor	Unidad
$\rho$	1,2	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	1007	J/kg·K
$\nu$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s
$K$	$2,52 \cdot 10^{-2}$	W/m·K
$Pr$	$7,31 \cdot 10^{-1}$	-

Fuente: Tomado de Çengel y Ghajar, 2011.

Número de Grashof

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T1 - Ta) * L^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 * 0,00340136 * (22 - 20^{\circ}C) * 1,15^3 \text{ m}}{1,53 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 4,36 \times 10^8$$

Número de Rayleigh

$$Ra_L = Gr_L * Pr = \frac{g * \beta * (T1 - Ta) * L^3}{\nu * \alpha}$$

$$Ra_L = 4,36 \times 10^8 \times 7,31 \times 10^{-1} = 3,19 \times 10^8$$

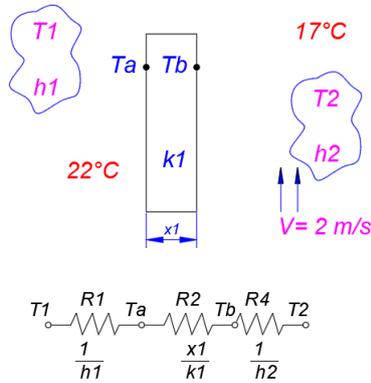
“Correlación de Churchill y Chu para la convección libre sobre una superficie vertical a temperatura constante aplicable para todo  $Ra_L$ . Propiedades calculadas a  $Tf = (Ta+T1)/2$ ” (Çengel & Ghajar, 2011)

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{H}L}{k} = 0,825 + \left( \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 = 9,32$$

Entonces;

$$h_1 = \frac{Nu * k}{L} = \frac{9,32 * 2,52 * 10^{-2} \frac{W}{m * K}}{1,15 \text{ m}} = 0,204 \frac{W}{m^2 * K}$$

La **Figura 13** muestra el circuito térmico equivalente para las paredes laterales del invernadero para almácigo de café.



**Figura 13.** Circuito térmico equivalente para las paredes planas del almácigo.

$$\dot{q}'' = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1} + \frac{x}{k_1} + \frac{1}{h_2}} = \frac{T_1 - T_a}{1/h_1} = \frac{T_b - T_2}{1/h_2}$$

$$\dot{q}'' = \frac{22 - 17^\circ C}{\frac{1}{0,20 W/m^2 * K} + \frac{2 \times 10^{-4} m}{0,35 W/m * K} + \frac{1}{5,11 W/m^2 * K}} = 0,98 \frac{W}{m^2}$$

Ahora se calcula  $T_a'$

$$0,98 \frac{W}{m^2} = \frac{30^\circ C - T_a'}{1/0,204 (W/m^2 * K)}$$

Despejamos,  $T_a' = 17,19^\circ C$

También se calcula  $T_b'$

$$0,98 \frac{W}{m^2} = \frac{T_b - 17^\circ C}{1/5,11 (W/m^2 * K)}$$

Despejamos,  $T_b' = 17,19^\circ C$

### Cálculo de error relativo

$$\varepsilon_{r_a} = \left| \frac{T_a - T_a'}{T_a} \right| = \left| \frac{20 - 17,1927}{20} \right| * 100 \% = 14,03 \%$$

$$\varepsilon_{r_b} = \left| \frac{T_b - T_b'}{T_b} \right| = \left| \frac{19 - 17,1922}{19} \right| * 100 \% = 9,51 \%$$



Así mismo, para la pared plana interna se realiza una segunda iteración con la finalidad de alcanzar un error igual o menor al 5 %.

$$Tf = \frac{Ta + T1}{2} = \frac{17,5 + 22^\circ C}{2} = 19,75^\circ C$$

$$\beta = \frac{1}{19,75 + 273} = 0,0034159$$

En la **Tabla 6** se rescatan los valores interpolados de la tabla A15 de Çengel y Ghajar, 2011, para una temperatura de 19.75 °C.

**Tabla 6.** Propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 19,75 °C.

Propiedades termofísicas del aire a 19.75 °C	Valor	Unidad
$\rho$	1,205	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	1007	J/kg·K
$V$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s
$K$	$2,51 \cdot 10^{-2}$	W/m·K
$Pr$	$7,31 \cdot 10^{-1}$	-

Fuente: Tomado de Çengel y Ghajar, 2011.

Con estos valores se procede a calcular para la pared plana interna del almacigo de café siguiendo el procedimiento de la iteración 1, con base a ello los resultados se ven reflejados en la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Segunda iteración para la pared plana interna.

Pared plana interna	Valor
Número de Grashof	$1,00 \cdot 10^9$
Número de Rayleigh	$7,31 \cdot 10^8$
Correlación de Churchill y Chu para todo Rayleigh (Nusselt)	$1,06 \cdot 10^1$
Coefficiente de transferencia de calor por convección ( $h_1$ )	0,23 W/m <sup>2</sup> K
Flujo de calor por unidad de área, $q''$	5,11 W/m <sup>2</sup>
Error relativo de $T_a$	1,61 %
Error relativo de $T_b$	1,62 %

Como se aprecia en la **Tabla 7**, los errores calculados en base a la temperatura propuesta son menores al 5 %, por lo que es aceptable y el cálculo termina ahí para las paredes laterales del invernadero para almacigo de café.

**5.3.2.4 Superficie plana inferior (Piso)** Se tomaron los siguientes datos.

- $v = 2 \text{ m/s}$
- $A = 1,035 \text{ m}^2$
- $P = 4,1 \text{ m}$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $T_1 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_2 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_a = 19 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_b = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$
- Sustrato (Fundas):  
 $x_1 = 0,203 \text{ m}, \quad k_1 = 1,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- Geomembrana:  
 $x_2 = 0,0007 \text{ m}, \quad k_2 = 0,4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- $T_f = 20,5 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\beta = 0,00340716$

**Superficie plana inferior externa (piso)** El coeficiente de transferencia de calor por convección externa:  $h_2 = 5,11 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  **Superficie plana inferior interna (piso)** Se recogen los datos de la **Tabla 8**, propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tabla 8.** Propiedades termofísicas del aire a  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Propiedad del aire a $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$	Valor	Unidad
$\rho$	1,202	$\text{kg}/\text{m}^3$
$C_p$	1007	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
$V$	$1,83 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^2/\text{s}$
$K$	$3 \cdot 10^{-2}$	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$
$Pr$	$7,31 \cdot 10^{-1}$	

Fuente: Tomado de Çengel y Ghajar, 2011.

$$\text{Longitud característica } L_c = \frac{A}{p} = \frac{1,035 \text{ m}^2}{4,1 \text{ m}} = 0,25 \text{ m}$$

Número de Grashof a longitud característica.

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_1 - T_a) * L^3}{\nu^2} = 4816698,43$$

Número de Rayleigh a longitud característica.

$$Ra_{Lc} = Gr_{Lc} * Pr = 3,52 \cdot 10^6$$

Se aplica las “Correlaciones de convección libre para la superficie superior de una placa horizontal caliente o para la superficie inferior de una placa horizontal fría a temperatura constante: Propiedades calculadas a  $T_f$ ” (Çengel & Ghajar, 2011)

$$\bar{Nu}_L = 0,51 Ra_L^{1/4} \text{ si } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \text{ y } \bar{Nu}_L = 0,15 Ra_L^{1/3} \text{ si } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$$

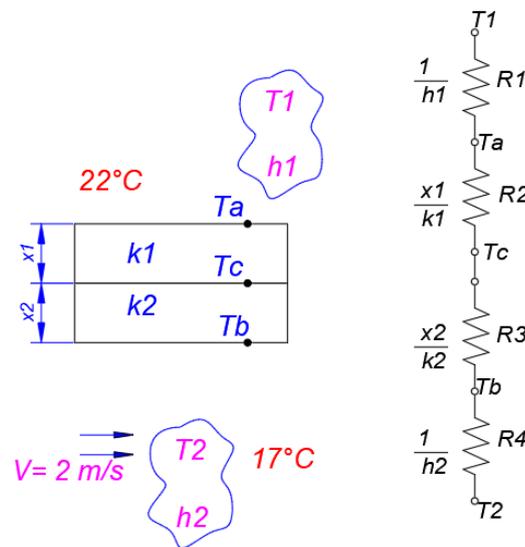
Nusselt a longitud característica

$$Nu_L = 0,54Ra_{Lc}^{1/4} = 23,39$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección h1

$$h1 = \frac{Nu_L \cdot k}{L} = 2,78 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

La **Figura 14** muestra el circuito térmico equivalente para la superficie superior de una placa horizontal caliente.



**Figura 14.** Circuito térmico equivalente para las superficie plana inferior (piso).

$$q'' = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_2}} = \frac{T_1 - T_a}{\frac{1}{h_1}} = \frac{T_b - T_2}{\frac{1}{h_2}} = 6,66 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

Cálculo de error relativo

$$T_{a'} = 19,6044^\circ\text{C}$$

$$T_{b'} = 18,3032^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_{r_a} = \left| \frac{T_a - T_{a'}}{T_a} \right| = \left| \frac{19 - 19,6044}{19} \right| * 100 \% = 3,18 \%$$

$$\varepsilon_{r_b} = \left| \frac{T_b - T_{b'}}{T_b} \right| = \left| \frac{17,5 - 18,3032}{17,5} \right| * 100 \% = 4,59 \%$$

Como los errores se encuentran por debajo del 5%, los cálculos son aceptables.

**5.3.2.5 Superficie plana superior (Techo)** El coeficiente de transferencia de calor por convección externa es  $h2 = 5,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

**Superficie plana superior interna (techo)** Se recogen los datos de la **Tabla 9**, propiedades termo-físicas del aire a presión de 1 atm a 21.5 °C.

**Tabla 9.** Propiedades termofísicas del aire a 21.5 °C.

Propiedad del aire a 21.5 °C	Valor	Unidad
$\rho$	1,20	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	1007	J/kg*K
$V$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s
$K$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	W/m*K
$Pr$	$7,31 \cdot 10^{-1}$	

Fuente: Tomado de Çengel y Ghajar, 2011.

$$\text{Longitud característica } Lc = \frac{A}{p} = \frac{1,035m^2}{4,1m} = 0,252 \text{ m}$$

Número de Grashof a longitud característica.

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T1 - Ta) * L^3}{\nu^2} = 2289155,85$$

Número de Rayleigh a longitud característica.

$$Ra_{Lc} = Gr_{Lc} * Pr = 1,67 \cdot 10^6$$

Se aplican las “Correlaciones de convección libre para la superficie inferior de una placa horizontal caliente o para la superficie superior de una placa horizontal fría a temperatura constante: Propiedades calculadas a Tf” (Çengel & Ghajar, 2011)

$$\bar{Nu}_L = 0,27Ra_L^{1/4} \text{ con } -10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}$$

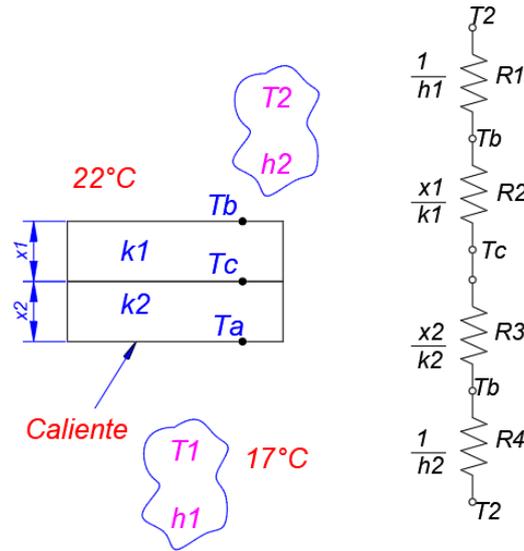
Nusselt a longitud característica

$$Nu_L = 0,54Ra_{Lc}^{1/4} = 9,71$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección h1

$$h1 = \frac{Nu_L * k}{L} = 0,98 \text{ W/m}^2 * \text{K}$$

La **Figura 15** muestra el circuito térmico equivalente para la superficie inferior de una placa horizontal caliente.



**Figura 15.** Circuito térmico equivalente para las superficie plana superior (techo).

$$q'' = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_2}} = \frac{T_1 - T_a}{\frac{1}{h_1}} = \frac{T_b - T_2}{\frac{1}{h_2}} = 0,51 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

Cálculo de error relativo

$$T_{a'} = 21,4820^\circ C$$

$$T_{b'} = 17,0990^\circ C$$

$$\varepsilon_{r_a} = \left| \frac{T_a - T_{a'}}{T_a} \right| = \left| \frac{21 - 21,4820}{21} \right| * 100 \% = 2,295 \%$$

$$\varepsilon_{r_b} = \left| \frac{T_b - T_{b'}}{T_b} \right| = \left| \frac{17,5 - 17,0990}{17,5} \right| * 100 \% = 2,291 \%$$

Como los errores se encuentran por debajo del 5%, los cálculos son aceptables.

**5.3.2.6 Balance energético** Para realizar el balance energético se toman las potencias de entrada y las de salida, esto con la finalidad de saber si se necesita alguna niquelina para calentar el invernadero para el almácigo de café, o si basta con las potencias instaladas y la radiación solar. (Véase la ecuación 5)

$$P_{eR} + P_{eV} + (\alpha * G * A) + P_{lamp} = \dot{Q}_{[aire]} + \dot{q} + \dot{Q}_{H_2O} \quad (5)$$

$$P_{eR} = \dot{Q}_{aire} + \dot{q} + \dot{Q}_{H_2O} - P_{eV} - (\alpha * G * A)$$

A la potencia eléctrica de la lámpara para plantas se la desprecia, ya que ésta solo se encenderá durante la noche y/o madrugada, además es importante mencionar que no aporta mucha temperatura. Algunos datos de las potencias tomadas en cuenta y datos

relevantes se muestran a continuación:

- $P_{eV} = 15 \text{ W}$
- $\dot{Q}_{\text{aire}} = 13,815 \text{ W}$
- $\dot{Q}_{H_2O} = 4,1107 \text{ W}$
- Área =  $1,035 \text{ m}^2$
- Absortividad  $\alpha = 0,8$
- Irradiancia  $G = 200 \text{ W}$

$$\dot{q}_1 = 5,11 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 2,706 \text{m}^2 = 13,827 \text{ W}$$

$$\dot{q}_2 = 6,66 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 1,035 \text{m}^2 = 7,617 \text{ W}$$

$$\dot{q}_3 = 0,51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 1,035 \text{m}^2 = 0,53 \text{ W}$$

Es decir la densidad de flujo de calor total  $\dot{q} = 21,975 \text{ W}$ . Entonces;

$$P_{eR} = 13,815 \text{W} + 21,975 \text{W} + 4,1107 \text{W} - 15 \text{W} - (0,8 * 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 1,035 \text{m}^2) = -140,7 \text{ W}$$

Es decir, con las potencias instaladas y la energía absorbida por el invernadero durante irradiancia solar que sería en el día, no se necesita niquelina o algún otro elemento que añada calor al sistema. Por otro lado, en la noche donde no existe aporte de calor por la irradiancia solar y la temperatura disminuye, se necesita añadir calor, en base a ello se ha usado la **ecuación 6**, ya que permite compensar pérdidas de calor por radiación, renovación de aire, conducción, convección y por el suelo.

Para calcular las necesidades de calefacción en el invernadero se ha basado en hojas técnicas para Climatización de invernaderos de Group, 2016, quien también se rige en recomendaciones de la ASAE (American Society of Agricultural Engineers). En base a ello se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Salto térmico deseado entre la temperatura exterior ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y la deseada en el interior ( $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ), lo cual significa un salto térmico de  $12^\circ$ .
- Pérdidas de aire generadas por la aportación de aire exterior, ya sea forzado o de forma natural.
- Superficie y tipo de material con el que está construido el invernadero.
- Volumen (en caso de que concurren al mismo tiempo ventilación y calefacción).

Para obtener la potencia necesaria para suplir con la temperatura dentro del invernadero, aplicamos la siguiente fórmula:

$$Ct = K * S * (T_i - T_e) \tag{6}$$

Donde:

- Ct = Potencia necesaria (W).
- K = Coeficiente de pérdidas por conducción- convección. Ver tabla 10.
- S = Superficie en metros cuadrados de paredes y techo.
- $\Delta T$  = Diferencia entre temperatura interna del invernadero y externa( °C) (Martínez & Roca, 2011).

**Tabla 10.** Coeficientes de pérdidas por conducción y convección en invernadero.

Cubierta	$K_{cc}$ (W/m <sup>-2</sup> . °C)
Cristal	6,3
Lámina de polietileno PE	6,8
Láminas de PE en cubierta doble PE-CD	4,0
Metacrilato alveolar doble	3,0
Cristal cubierta doble	3,0
Cristal más pantalla térmica	3,0
PE-CD más pantalla térmica	2,5

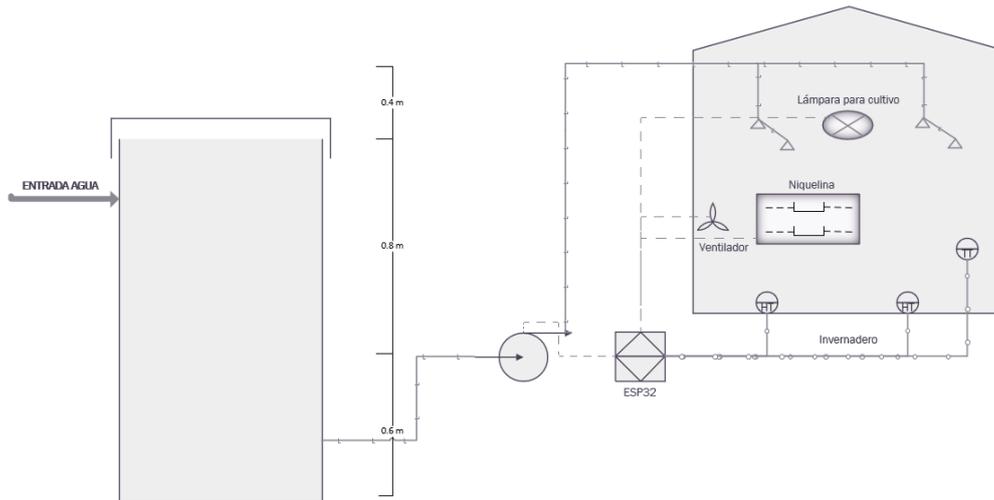
Fuente: Martínez y Roca (2011)

$$Ct = 6,8\left(\frac{W}{m^2 * ^\circ C}\right) * 4,46(m^2) * (22 - 10)^\circ C = 364 W$$

Una vez que se ha calculado la cantidad de calor necesaria para compensar las pérdidas térmicas y mantener la temperatura deseada en el invernadero se aplicó un coeficiente corrector por pérdidas debido a los canales de ventilación en un 10 %, en base a ello se necesita una potencia de niquelina de 400 W, pero el control se lo pretende hacer en 30 min, por lo que la potencia de la niquelina estaría alrededor de **800 W** para realizar el control en un tiempo aproximado de media hora.

### 5.3.3. Dimensionamiento de la bomba para el sistema de riego por atomización en el almácigo

En la **Figura 16**, se muestra el diagrama acerca de los distintos elementos que se encuentran presentes en el almácigo, para el dimensionamiento de la bomba para el riego por atomización hay que centrarse en el circuito hidráulico.



**Figura 16.** Diagrama del almácigo de café.

### Datos de succión

- Longitud de tramo: 1 m
- Diámetro de tubería: 10 mm = 0,01 m
- Caudal =  $7,5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$
- $Z1 = 1,40$  m
- Pérd. sec. → 1 codo redondeado  $k = 0,05$

### Datos de descarga

- Longitud de tramo: 2,5 m
- Diámetro de tubería: 0,31 in = 0,00787 m
- $Z2 = 1,80$  m
- Presión en la boquilla = 2 - 12 bar
- Pérd. sec. → 3 empalmes en T normal sin cambio de dirección  $k = 0,35$ ; 1 empalme en T normal con cambio de dirección  $k = 1,8$
- Pérd. sec. → 5 codos redondeados  $k = 0,05$
- Pérd. sec. → Salida de depósito, orificio borda  $k = 1$
- Pérd. sec. → Estrechamiento brusco  $k = 0,755$
- Diám. boquilla = 0,001016 m

Se aplica la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + Hmin = \frac{p_2}{\gamma} + Z2 + \frac{v_2^2}{2 * g} + hf \quad (7)$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + H_{mi} = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} + hf$$

La presiones relativas en succión y descarga se eliminan al estar a presión atmosférica, además la velocidad en el punto 1 también es despreciable.

$$H_{mi} = f(Q)$$

La presión en las boquillas de atomización es de 2 bar (más crítica) que también puede ser reescrita como 20.4 m.c.a. La ecuación 8 hace referencia a la ecuación de continuidad en tubería circular.

$$Q = \frac{v * \pi * D^2}{4} \rightarrow v = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad (8)$$

$$\frac{v^2}{2g} = \left( \frac{4Q}{\pi d^2} \right)^2 \frac{1}{2g} = \frac{8 * Q^2}{\pi^2 * g * d^4} = 20,4m.c.a.$$

$$H_{mi} = \Delta Z + \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4} + 10,674 \frac{L_1}{C_1^{1,852} D_1^{4,871}} Q^{1,852} + 10,674 \frac{L_2}{C_2^{1,852} D_2^{4,871}} Q^{1,852} + \sum k_1 \frac{8Q^2}{\pi^2 g D_1^4} + \sum k_2 \frac{8Q^2}{\pi^2 g D_2^4}$$

Ahora para calcular las pérdidas primarias se necesita obtener el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.

Los valores de rugosidad para la tubería de PVC Y PE es de 0.0007 cm (Almandoz Berrondo et al., s.f.). (Véase la **Figura 50**), entonces para la tubería de succión queda;

$$\frac{\epsilon}{D_1} = \frac{0,0007cm}{1cm} = 7 \times 10^{-4}$$

Y para la tubería de descarga es;

$$\frac{\epsilon}{D_2} = \frac{0,0007cm}{0,787cm} = 8,894 \times 10^{-4}$$

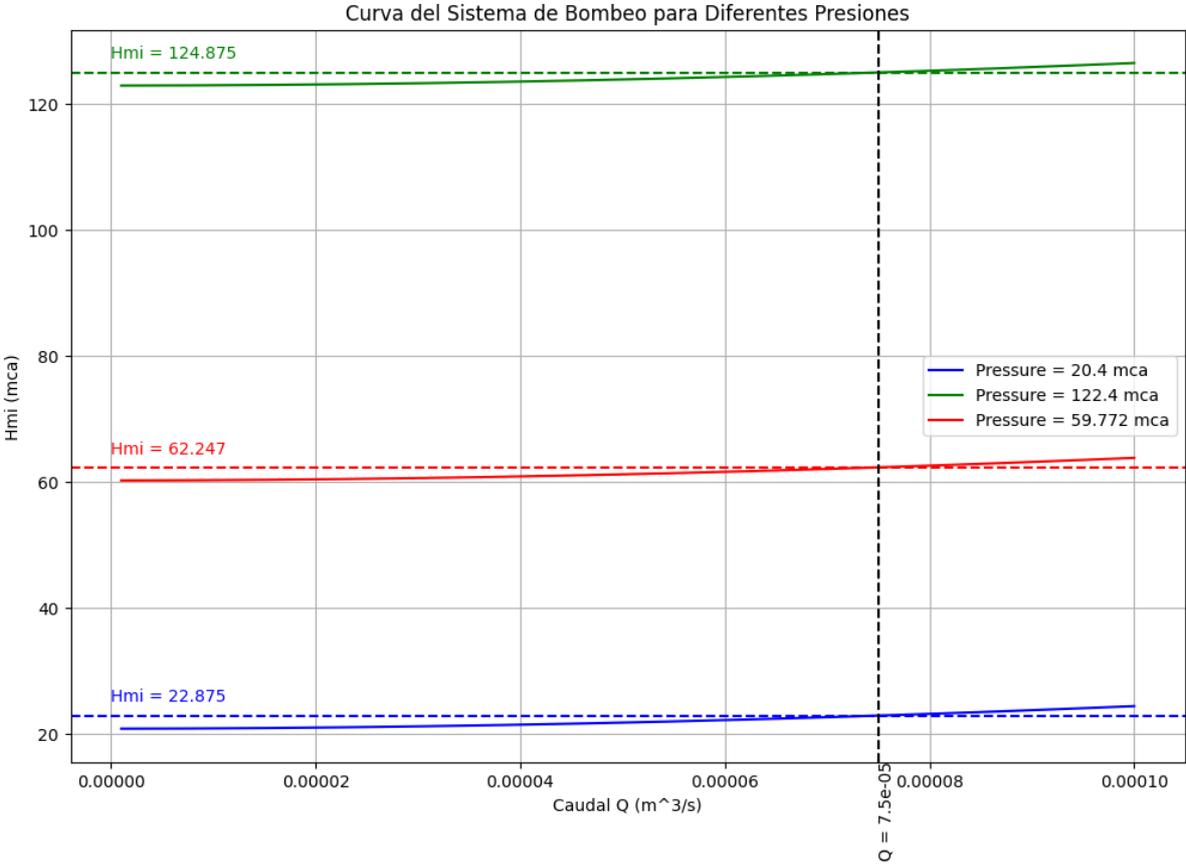
Entonces el  $C_{HW}$ , tanto para la tubería de succión y para descarga es de 130. (Véase la **Figura 51**). Así mismo, hay que tomar los datos de coeficientes k para pérdidas secundarias. (Véase el **Anexo 4**)

$$H_{mi} = (1,80 \text{ m} - 1,40 \text{ m}) + 20,4m.c.a + 0,05 \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,01)^4} + (3 \cdot 0,35 + 1,8 + 5 \cdot 0,05 + 1 + 0,755) \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,00787)^4} + 10,674 \cdot \frac{1 \text{ m}}{130^{1,852} \cdot (0,01)^{4,871}} \cdot Q^{1,852} + 10,674 \cdot \frac{2,5 \text{ m}}{130^{1,852} \cdot (0,00787)^{4,871}} \cdot Q^{1,852}$$

La ecuación anterior representa el sistema de bombeo empleando la ecuación de Bernoulli.

$$H_{mi} = 21,4 \text{ mca.}$$

Este valor se alcanza cuando el caudal suministrado es de  $7,5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$  cuando la presión en la boquilla requerida es de 2 bar. En la **Figura 17** se aprecia la curva del sistema de bombeo para la presión que se necesita en la boquilla de 2 (línea azul) a 12 bar (línea verde), además también se encuentra la curva que proporciona la presión de la bomba de 5,86 bar (línea roja). En base a ello se puede concluir que la bomba se encuentra dentro del rango de la presión necesaria para funcionar correctamente la presión en la boquilla de atomización.



**Figura 17.** Curva del sistema de bombeo a diferentes presiones.

**5.4. Validación de cantidad de sensores que permitan cubrir con el área del almácigo. (DHT22)**

La gestión y monitoreo de los datos obtenidos dentro del almácigo para café es fundamental para cumplir con el crecimiento de las plantas y la eficiencia de recursos. La implementación del sensor de temperatura y humedad ambiente (DHT22, AM2302) y el sensor de humedad de suelo (HD-38), deben ser capaces de cubrir con el área requerida dentro del almácigo, es decir las fluctuaciones de las variables monitoreadas deber ser lo

más homogéneas dentro del almacigo. Para ello la siguiente práctica tiene como objetivo la validación de los puntos más críticos en el sistema de control, así como la cantidad de sensores a emplearse dentro del almacigo.

#### 5.4.1. *Sensor de humedad y temperatura ambiente: DHT22 (AM2302)*

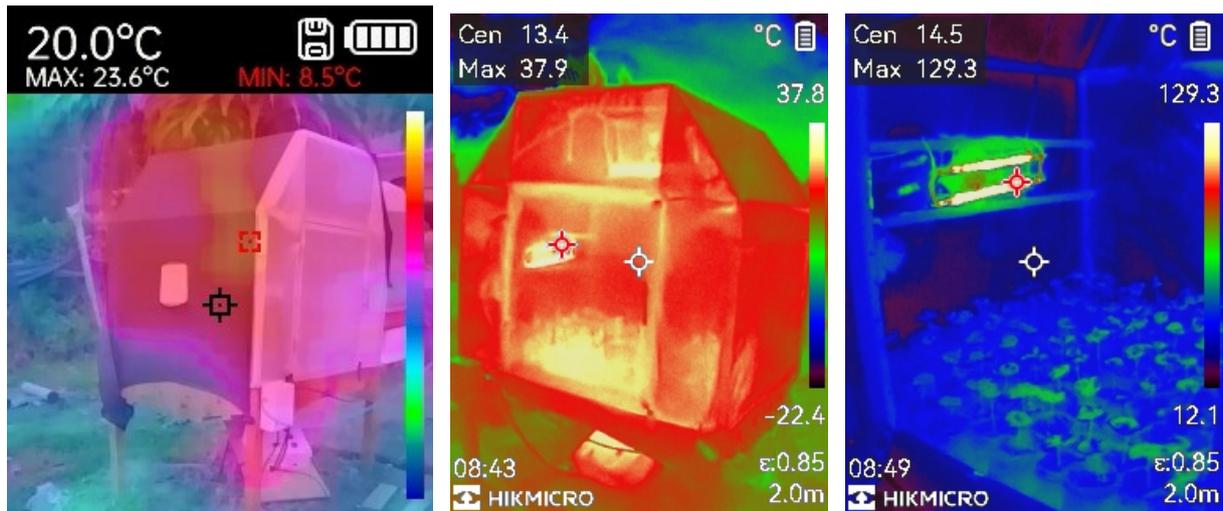
El DHT22, es un sensor de temperatura y humedad ambiente, utilizado para pruebas de monitoreo ambiental. Las lecturas que proporciona este sensor son precisas en base al área de monitoreo del prototipo para almacigo de café, los rangos de medición de temperatura van de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una resolución de  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, el rango de medición de humedad ambiente relativa va de  $0\%$  a  $100\%$ , cuenta con una precisión del  $2\%$  y una resolución del  $0.1\%$ , la señal de salida es digital y la distancia máxima para transmitir esta información es de  $20\text{ m}$ . (ELECTRONICS, s.f.).

Para cumplir con la validación de la cantidad de sensores a usarse dentro del almacigo de café se debe determinar el rango de cobertura del sensor que dependen de factores ambientales y de instalación.

**Tabla 11.** Validación del sensor DHT22 en el almacigo

<b>Determinación del ambiente</b>	<b>Altura de colocación del sensor</b>	<b>Distribución del sensor</b>
Ambiente relativamente homogéneo debido al nivel de aislamiento del plástico y polisombra del invernadero. Se colocó 2 sensores para comprobar que las lecturas de temperatura y humedad no presenten variaciones significativas (rango de precisión), según este criterio se colocó un sensor.	Se requiere monitorear la temperatura a nivel de las hojas de las plantas, por lo que el sensor se colocó a $30\text{ cm}$ aproximadamente desde la base de la planta.	Se evaluó la temperatura más crítica mediante cámaras termográficas, mismas que pueden ser afectadas por la radiación solar, niquelina o lámpara de cultivo. La temperatura más crítica es la que inyecta calor al sistema mediante la niquelina, pues su flujo va directamente a las plantas.

*Nota.* La temperatura crítica se evaluó considerando la radiación de la niquelina, para ello se usó las cámaras térmicas NOYafa NF-521 y Hikmicro BO1, por lo que el sensor se montó en la pared lateral izquierda.



(a) Captura termográfica exterior en el día.

(b) Captura termográfica exterior en la noche.

(c) Captura termográfica interior en el día.

**Figura 18.** Comparación de capturas termográficas del invernadero en distintos momentos y ubicaciones.

### 5.5. Conversión ADC del sensor HD-38

El módulo sensor de humedad de suelo HD-38 tiene dos salidas: una analógica (AO) y una digital (DO). Este sensor cuenta con dos terminales que permiten el paso de corriente cuando hay humedad, lo que resulta en una baja resistencia. En contraste, cuando el suelo tiene bajos niveles de humedad, la resistencia al paso de corriente es alta. La corriente de salida de este sensor es de 30 mA. Para obtener una lectura precisa y adecuada de la salida analógica, es necesario realizar una conversión de analógica a digital (ADC) (Electrostore, s.f.).

Valvano y Yerraballi (2014), menciona que el ESP32 posee dos ADC's el ADC (analog-to-digital converter) SAR (Successive Approximation Register) de 12 bits a 3.3 V.

- 8 canales: GPIO32 - GPIO39
- 10 canales: GPIO0, GPIO2, GPIO4, GPIO12 - GPIO15, GOIO25 - GPIO27

La resolución de un ADC está determinada por el número de bits,

$$Resol = 2^{12} = 4096 \text{ niveles}$$

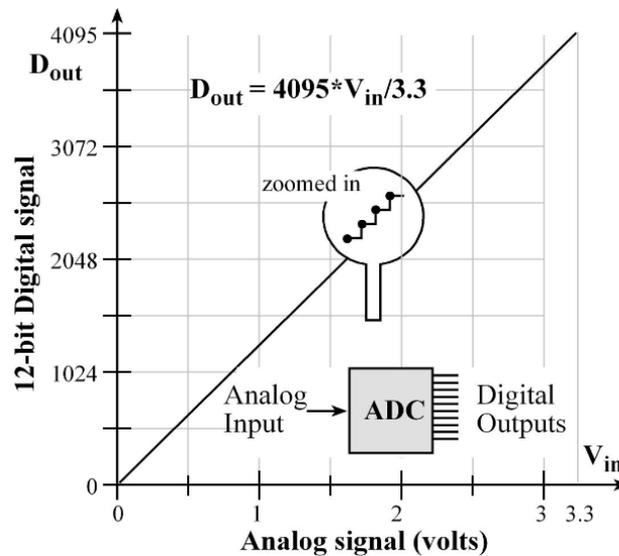
Los valores digitales que puede producir el ADC van desde 0 hasta  $2^{12} - 1 = 4095$ , es decir, de 0 a 4095.

El valor digital ADC que corresponde a un voltaje V en un sistema con una refe-

rencia de voltaje  $V_{ref} = 3,3V$ , se calcula como:

$$ADC = \frac{V}{V_{ref}} \times 2^{12} - 1$$

La resolución del ADC es el cambio más pequeño distinguible en la entrada (por ejemplo,  $3,3 \text{ V}/4095$ , que es aproximadamente  $0,81 \text{ mV}$ ). (Ver **Figura 19**)



**Figura 19.** Convertidor analógico a digital en un ESP32.

Fuente: Tomado de Valvano y Yerraballi, 2014.

### 5.5.1. Cálculo de caudal necesario para renovación de aire.

Para evaluar el cálculo de caudal necesario de un ventilador para la renovación de aire en un invernadero se ha hecho uso de las tablas de la norma UNE 100-011-91, la cual nos indica las renovación de aire en horas de un determinado volumen. Para los invernaderos estos se encuentran distribuidos según la temperatura alcanzada internamente. En la siguiente tabla se muestran los valores en grados centígrados y la cantidad de renovaciones por hora.

**Tabla 12.** Frecuencia de cambios de aire según la temperatura del invernadero

Temperatura del invernadero	Renovaciones de aire por hora
14 a 18°C	40 a 50
19 a 21°C	44 a 54
22 a 25°C	48 a 58
26 a 29°C	52 a 62
30 a 33°C	56 a 66
34 a 38°C	60 a 70

Fuente: Delgado, s.f.

Además algunas consideraciones que se debe tomar en cuenta es: La presión contra la que pueda operar el ventilador, la densidad del fluido que se debe desplazar, ruido permisible en el ventilador y salida del aire, corriente de alimentación, servicio del ventilador ya sea continuo o intermitente, cantidad de ventiladores, nivel de protección del ventilador y el ambiente de funcionamiento (Delgado, s.f.).

En base a lo mencionado el volumen del invernadero es el siguiente:

$$V = A * h = 1,035m^2 * 0,88m = 0,9108m^3$$

Renovaciones por hora 70 cambios debido a los registros que se puede llegar a alcanzar a días soleados. Además se tendrá que agregar factores de corrección según los vientos predominantes y pérdidas producidas en las entradas de aire por las mallas (20%).

$$Q = V * N = 0,9108m^3 * 70/h = 63,756m^3/h \rightarrow 76,5072m^3/h$$

Para calcular el número de ventiladores necesarios para la extracción de aire se usó la siguiente fórmula.

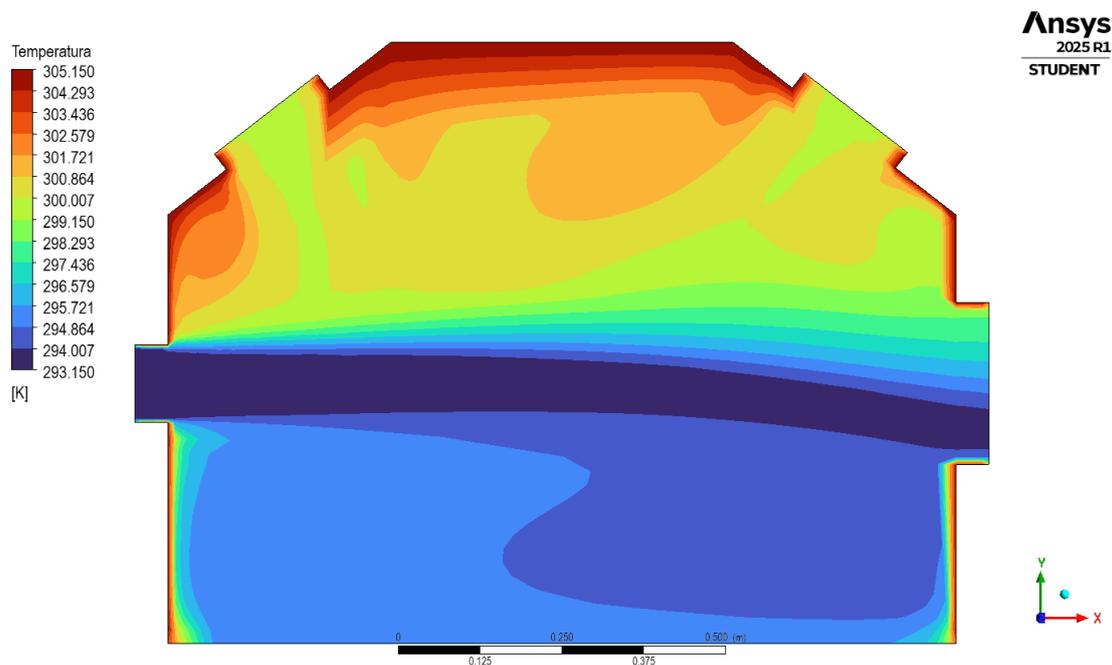
$$N = \frac{Q_{total}}{q_{caudal-ventilador}} = \frac{76,5072 \frac{m^3}{h}}{203,88 \frac{m^3}{h}} = 0,37$$

En base a ello se ha escogido un ventilador axial impermeable de 203,88  $m^3/h$ , con un nivel de protección IP55, con un rango de operación ambiente de -50 a 95 °C, ruido de 47 dBA y alimentación alterna de 115 VAC.

Es importante mencionar que cuando la irradiancia es alta en un día soleado, aún con las renovaciones hora de 45 renovaciones la temperatura dentro del invernadero será de 5,5 a 6,5 °C y con 60 renovaciones estará 4,5 a 5,5 °C (Delgado, s.f.).

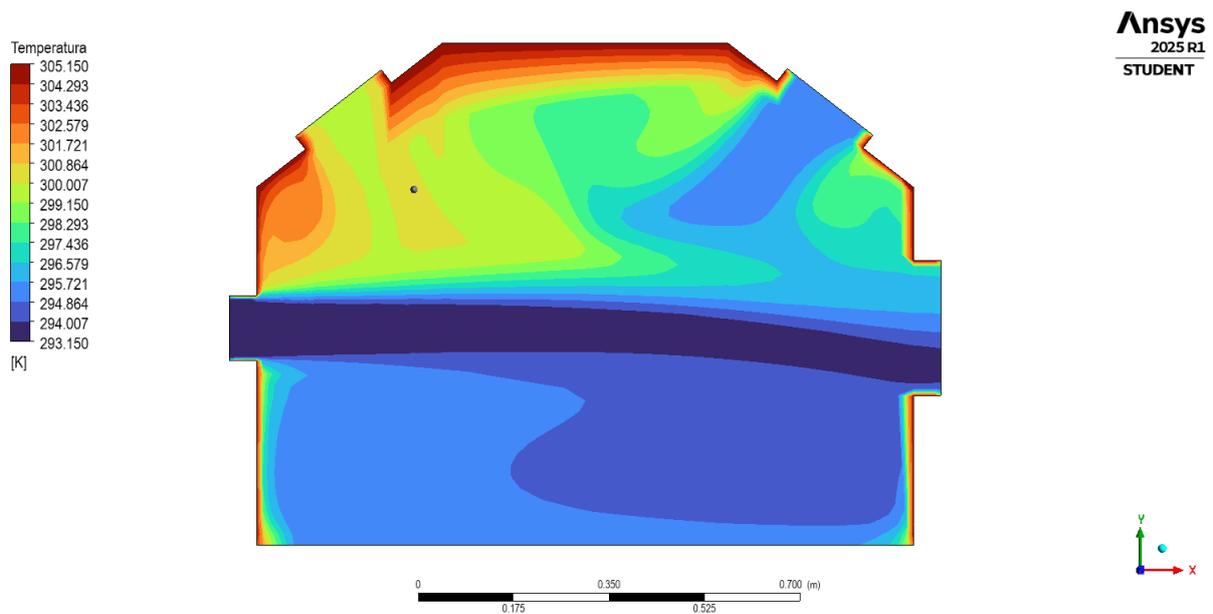
Con base en ello, se procedió a montar el ventilador y hacer pruebas para observar la eficacia del ventilador para disminuir la temperatura dentro del invernadero, debido a que evacuaba el calor pero la temperatura seguía estando muy por encima de los límites aceptados, es así que se utilizó el software de simulación por elementos finitos, Ansys student 2025 R1, en el que se usó el sistema de análisis Fluid Flow (Fluent), para la geometría del invernadero se usó Autodesk Inventor, se diseño un boceto en 2D y se lo exportó en formato CAD con extensión .step, seguidamente se modificaron los parámetros tanto en la malla, características del fluido, características del invernadero, número de simulaciones, tiempos, etc. En la **Figura 20** se aprecia el comportamiento del fluido impulsado por el ventilador de 203,88  $m^3/h$  para bajar la temperatura, en él se observa que disminuye en cierta forma la temperatura en la que se encuentran las plantas, pero debido a su velocidad y a su diámetro de entrada re-circula en la parte inferior del invernadero, pero la parte superior se ve comprometida por los niveles altos de temperatura que pueden

llegar a alcanzar.



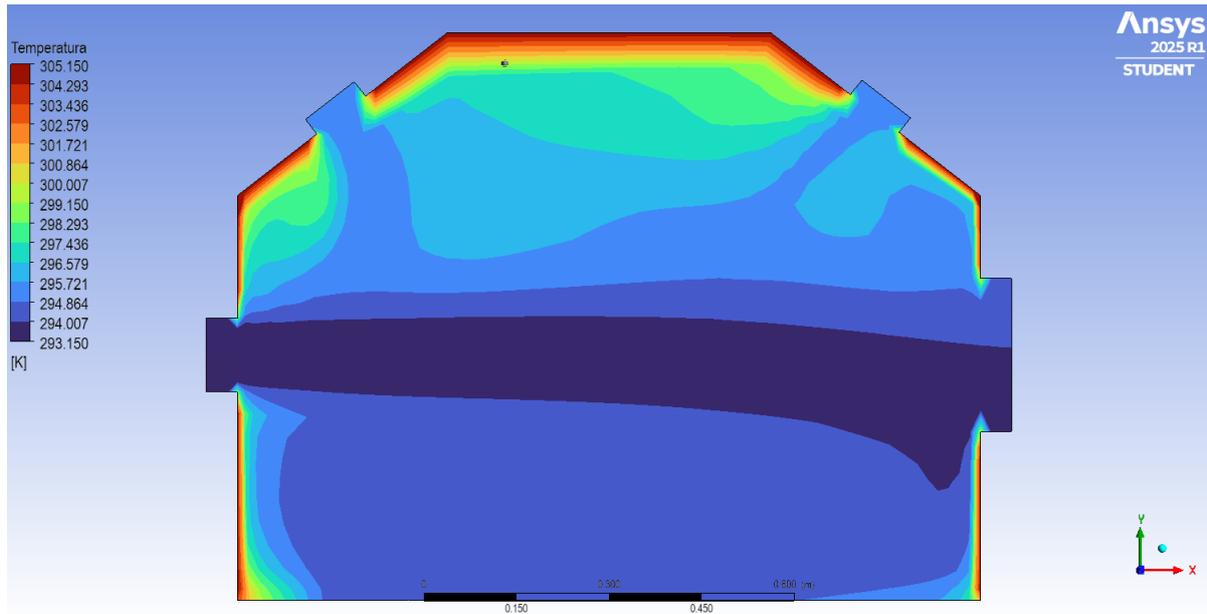
**Figura 20.** Comportamiento del fluido en el invernadero con un ventilador.

Para tratar de disminuir la temperatura en la parte superior del invernadero se realizó otra simulación pero empleando un extractor. En la **Figura 21**, se observa el comportamiento del fluido utilizando el mismo ventilador y agregándole un extractor de  $150 \text{ m}^3/h$ , cuyo objetivo es evacuar el calor de la parte superior del invernadero, pero como se observa la temperatura en la parte superior izquierda del invernadero sigue siendo alta.



**Figura 21.** Comportamiento del fluido en el invernadero con un ventilador un extractor

Finalmente, en la **Figura 22** se aprecia la simulación utilizando el mismo ventilador de  $203,88 \text{ m}^3/h$ , y dos extractores de aire de  $150 \text{ m}^3/h$ , en esta se observa el comportamiento del fluido donde re-circula bastante bien en la parte inferior donde se encuentran las plantas, pero a su vez con la ayuda de los extractores ubicados en la parte superior evacuan el calor de la parte alta reduciendo la temperatura a niveles aceptables dentro del invernadero. Para observar un video acerca de la simulación transitoria para evaluar el comportamiento del fluido para disminuir la temperatura dentro del invernadero de clic [aquí](#).



**Figura 22.** Comportamiento del fluido en el invernadero con un ventilador y dos extractores.

## 6. Resultados

La producción de café en Ecuador ha disminuido en los últimos años debido a la falta de renovación de las plantaciones y la ausencia de tecnología en un 85 % del sistema de cultivo. Esto ha sido agravado por la baja cotización del café en el mercado internacional y por la proliferación del hongo *Hemileia vastatrix*, que ha devastado las plantaciones antiguas, volviéndolas inservibles (Cumbicus et al., 2012).

En la provincia de Loja, la producción de café ocupó el segundo lugar a nivel nacional, con un 13.8 % de la producción en 2010 (Cumbicus et al., 2012). Loja ha destacado en competiciones como la Taza Dorada, impulsando el resurgimiento del interés por el cultivo de café mediante la tecnificación. Actualmente, en el vivero de la prefectura de Loja “Las Cochas” y en el cantón Olmedo, se cultivan diversas variedades de café como típica, geisha, bourbon, sidra, catucaí, caturra, sarchimor etc.

La variedad Sarchimor, resultante del cruce entre villa Sarchi CIFIC 971/10 e híbrido de Timor CIFIC 832/2, fue introducida en Ecuador con líneas como Sarchimor C-1669 y C-4260. Se caracteriza por su porte bajo, brotes bronceados, alta productividad, y resistencia a la roya (Cumbicus et al., 2012; López et al., 2016). La siguiente tabla muestra algunos aspectos generales en las condiciones adecuadas para el desarrollo del café.

**Tabla 13.** Condiciones adecuadas para el desarrollo del café.

<b>Características adecuadas para el desarrollo del café (Almácigo)</b>	
Altitud.	1200 a 1700 msnm
Temperatura	Entre 22 a 26 °C
Humedad relativa del ambiente	65 al 80 %
Humedad de suelo	60 a 70 %
Iluminación	50 al 75 %, aunque depende de las condiciones del sitio.
Suelo	Textura franco arenosa, con PH de 5.5 - 6.5
Control de enfermedades	Prevención de hongos: Mantener ventilación adecuada y evitar riego excesivo Control fitosanitario y control de maleza de forma manual, según los requerimientos.

Fuente: Venegas et al., 2018.

Para el estudio del almácigo se eligió la variedad Sarchimor debido a su importancia en la producción local. Según Myway (2024), esta planta se desarrolla bien en altitudes bajas a moderadas. Para el control de la temperatura y humedad se utilizó un invernadero que proporciona un ambiente controlado para el crecimiento adecuado de las plantas, minimizando la incidencia de enfermedades. El invernadero está construido con plástico blanco de 200 µm, permitiendo la traslúcida entrada de luz solar, y está sombreado con

polisombra negra al 80 % para proteger contra la intensa radiación solar (Fernando et al., 2015). La estructura, hecha de aluminio, es liviana y de bajo mantenimiento, y se asemeja a un invernadero tipo capilla modificado, con un techo plano que optimiza la transferencia de calor. Orientado hacia el norte, aprovecha al máximo la energía solar dada su ubicación a una latitud de 4,03°.

El sistema de riego por atomización asegura una distribución uniforme del agua sin dañar las plantas. La ventilación es principalmente forzada mediante un ventilador y dos extractores, complementada por ventilación natural a través de rejillas cuando el ventilador no está en uso.

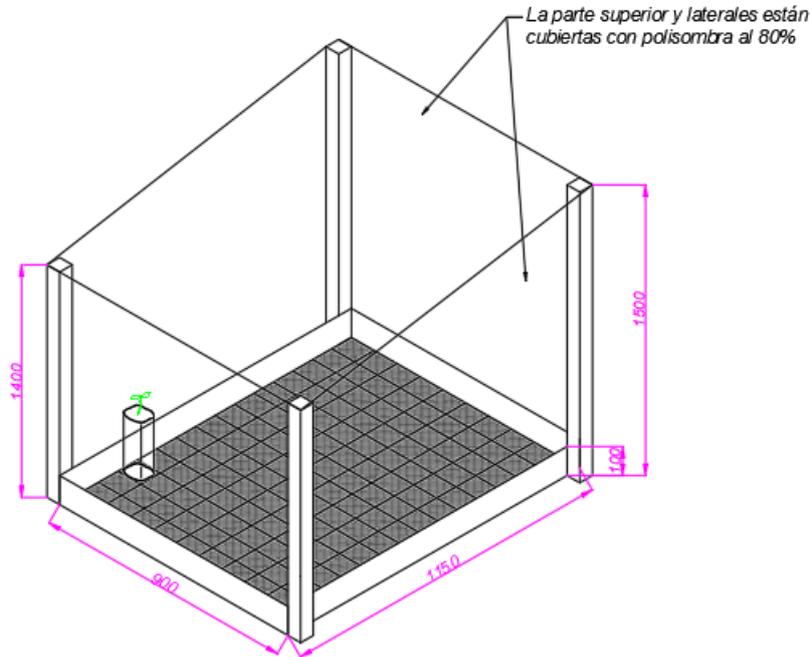
### **6.1. Diseño de prototipo no automatizado para almácigo de café de especialidad.**

Para el prototipo no automatizado, se desarrolló un almácigo para 150 plántulas de café de la variedad Sarchimor. Las bolsas que contienen las plántulas se ubicaron directamente sobre el suelo, en una superficie de aproximadamente 115 cm de largo y 90 cm de ancho. En los laterales de esta superficie, se utilizó tablas de alrededor de 10 cm de altura para servir de soporte a las bolsas y mantenerlas ordenadas.

La estructura para la cubierta de malla polisombra se construyó a escala, con una altura de 150 cm en su punto más alto y 140 cm en su punto más bajo. Para esta estructura, se utilizó listones de madera y alambre galvanizado. La cubierta es de polisombra negra al 80 %, ya que según Fernando et al. (2015) "La mejor alternativa, avalada por los organismos de certificación, es la instalación de umbráculos, los cuales pueden hacerse con polisombra del 50 % al 75 %, dependiendo de la localidad". El control de riego se realizó manualmente, según el criterio del autor y en función de las condiciones climáticas. La humedad, la temperatura y la ventilación fueron determinadas por las condiciones climáticas del sitio.

En la **Figura 23** se muestra la distribución de las bolsas para el almácigo, así como sus dimensiones.

Almácigo diseñado para 150 fundas de vivero 5x8"  
ordenadas en 10 filas x 15 columnas



**Figura 23.** Diseño del almácigo no automatizado para 150 plántulas de café.

Una vez desarrollado el sistema para el prototipo para almácigo de café no automatizado, se procedió a ubicarlo en las instalaciones de la Universidad Nacional de Loja, donde se le brindó el cuidado necesario para su posterior comparación acerca de sus resultados frente al prototipo automatizado. (Ver **Figura 24**)



**Figura 24.** Prototipo no automatizado para almácigo de café.

## 6.2. Diseño y construcción de prototipo automatizado para almácigo de café de especialidad

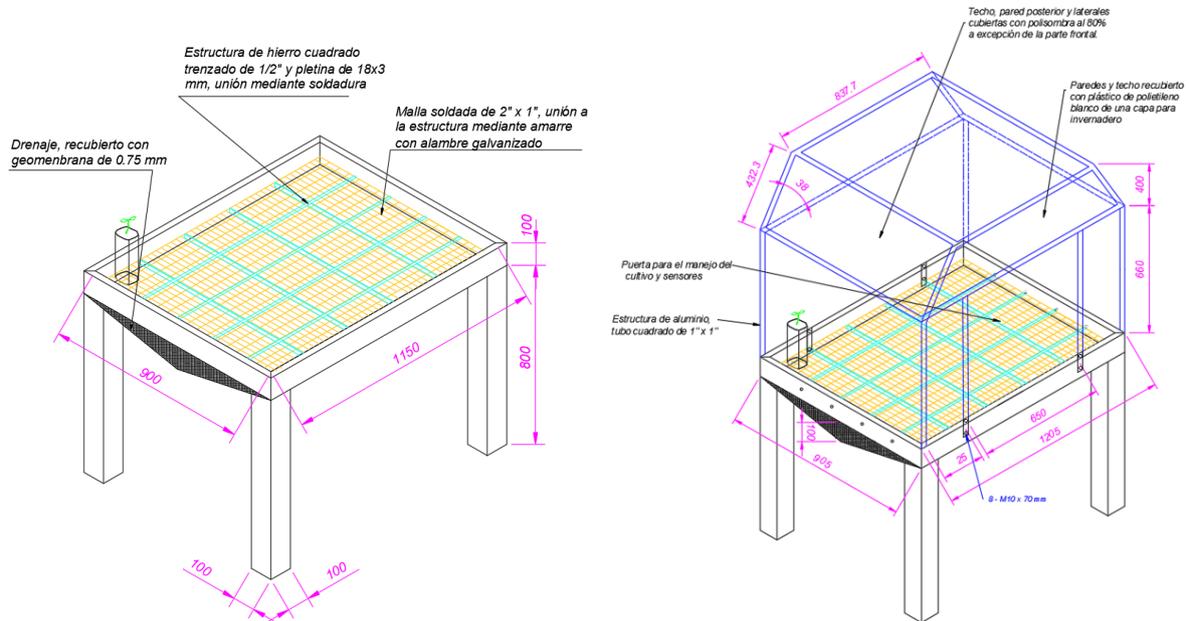
### 6.2.1. Propuesta de diseño

Para el diseño y construcción del prototipo automatizado para almácigos de café, se desarrolló un sistema capaz de manejar 150 plántulas de la variedad Sarchimor en fundas de vivero de 5 x 8". Este almácigo tiene una serie de características que permiten controlar algunas variables necesarias para el desarrollo de la planta de café como: temperatura, humedad, ventilación, así como el riego.

**6.2.1.1 Estructura y características del invernadero.** Para cumplir con el prototipo automatizado para almácigo de café se desarrolló un invernadero que permita el control de las variables antes mencionadas. En base a ello, se realizó un invernadero tipo monocapilla modificado que tuvo las siguientes características.

- Las fundas de vivero fueron montadas sobre una malla de acero galvanizado de 2" x 1", misma que fue ajustada sobre una estructura de hierro cuadrado trenzado de 1/2" y pletinas de 18 x 3 mm y esta a su vez sobre un cajón de madera de 1150 mm largo, 900 mm de ancho y 100 mm de profundidad que estuvo recubierto con geomembrana para evitar el deterioro por humedad, la parte inferior del cajón tuvo una cierta inclinación hacia el centro para que el agua o fertirriego suministrado que no sea aprovechado por la planta sea desalojada por ese lugar para asegurar un buen drenaje y evitar la proliferación de enfermedades como pudrición de las raíces o enfermedades desarrolladas por hongos como el Rhizoctonia y Phytophthora que su desarrollo es promovido por el exceso de riego y condiciones de humedad elevadas.
- El cajón que contiene las fundas de vivero fue montado sobre una estructura de madera a 800 mm del suelo con la finalidad de obtener un mejor acceso y manejo a las plantas, mejorar el drenaje y circulación del aire así también un mejor control de plagas y enfermedades que pueden estar en el suelo.
- El recubrimiento del invernadero para el techo y las partes laterales es plástico para invernadero de color blanco, además la parte posterior, techo y paredes laterales son cubiertas con polisombra al 80 % con la finalidad de garantizar la sombra adecuada para el desarrollo del café.
- La estructura para el soporte del recubrimiento del invernadero es de perfil cuadrado de aluminio de 1"x 1", con el fin de aligerar el peso. Fue montado encima del cajón mediante pletinas y sujetado con tornillos roscados y tuercas con la finalidad de que sea desmontable.
- La estructura del invernadero tiene una puerta de 65 x 66 cm que permite la manipulación o mantenimiento de los sensores o plantas, así también permite el poder

ingresar las fundas o sacarlas cuando el colino de café esté apto para su trasplante. En la **Figura 25** se muestra la estructura del invernadero y su cajón en el que se muestran sus cotas, este diseño es aconsejable debido a que el prototipo es a escala y para su manipulación es aconsejable realizarlo de esta manera.



(a) Diseño de la base para el prototipo de almácigo de café.

(b) Diseño de la estructura para el prototipo de almácigo de café.

**Figura 25.** Diseños propuestos para el prototipo de almácigo de café.

**6.2.1.2 Construcción del invernadero para el almácigo de café.** Siguiendo los lineamientos de la propuesta del diseño para la construcción del invernadero para el almácigo de café se inició seleccionando la madera. Se trabajó con madera de pino basándose en sus prestaciones, ya que es una madera blanda, peso ligero, fuerte y fácil de trabajar. Presenta los siguientes valores de resistencia a flexión estática  $1057 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia a la compresión de  $406 \text{ kg/cm}^2$  (Maderea, 2021). En la **Tabla 14** se muestra el proceso de construcción del invernadero para almácigo de café.

**Tabla 14.** Proceso de construcción del almácigo de café

Descripción	Imágenes
<p>El soporte principal está compuesto por listones cuadrados de 10 cm de ancho y 80 cm de altura. Las partes laterales del cajón se construyeron con tablas de 10 cm de ancho y 2,5 cm de espesor. Las dimensiones restantes fueron especificadas en el diseño.</p>	
<p>Colocación de la geomembrana, cuya función es proteger la madera y facilitar el drenaje del almácigo de café. Para ello, se utilizaron cuatro listones de madera (marcados en color azul) que sirven como soporte para adherir la geomembrana al cajón. La geomembrana se fijó en su posición utilizando cemento de contacto.</p>	
<p>Se colocó la estructura que servirá de soporte para las fundas, esta estructura está conformada por 4 varillas de hierro cuadrado trenzado de 1/2" y pletina de hierro de 18x3 mm, además encima de esta estructura se colocó malla soldada galvanizada de 2" x 1", todas estas uniones se realizaron con ayuda de alambre de amarre galvanizado #16.</p>	
<p>La estructura que sirvió para soporte del plástico de invernadero fue realizada con tubo cuadrado de 1". El tubo se cortó a las medidas especificadas en el diseño y se unió mediante anclas plásticas internas y nudos para las dimensiones de este tubo. Además, se emplearon remaches de 5/32" x 1/2" para asegurar las uniones.</p>	

*Continúa en la siguiente página*

Descripción	Imágenes
<p>Finalmente, con la estructura de aluminio ya terminada, se procedió a cubrirla con plástico para invernadero de color blanco. Para asegurar el plástico, se utilizaron pequeños listones de madera atornillados al aluminio. Además, para darle un mayor acabado y protección a la estructura de madera, se utilizó spray para madera color caoba, cuya finalidad es brindarle mayor impermeabilidad y resistencia a condiciones climáticas.</p>	

*Nota.* Se presentan las etapas de construcción del invernadero para almácigo de café, cuyos principales componentes fueron madera, aluminio y plástico.

### 6.2.2. Preparación y manejo del almácigo de café

En la **Tabla 15** se muestran los procesos de preparación, manejo y siembra de las chapolas de café.

**Tabla 15.** Proceso de construcción del almácigo de café

Descripción	Imágenes
<p>Se utilizó una mezcla de tierra húmifera alrededor de 65 % y materia orgánica descompuesta (tamo de café) en un 25 %, para alcanzar una textura franco-arenosa se agregó arena de río en un 10 %, esto con la finalidad de que el sustrato tenga coherencia entre partículas, pero que a su vez no sea demasiado compacto. Además todos estos componentes fueron tamizados en un cernidor de 1 " para eliminar la materia de mayor tamaño que podría afectar al desarrollo de las raíces. Para el llenado se fundas se utilizó fundas de vivero de 6 x 8 ", el tamaño de la funda se la escogió con la finalidad de obtener colinos de café aptos para su trasplante en un tiempo aproximado de seis meses, tiempo necesario para el desarrollo del almácigo sin que las raíces del café se desarrollen demasiado evitando deformaciones en la misma.</p>	

*Continúa en la siguiente página*

Descripción	Imágenes
<p>Para realizar el trasplante de chapola de café a las fundas de vivero, se procedió a escoger de la cama de germinación las chapolas que cumplan con características de ser aptas para su trasplante, evitando chapolas con síntomas de volcamiento, deformación en las raíces y chapolas que aún no se encuentren con sus hojas cotiledonares extendidas.</p>	
<p>Una vez que se trasplantaron las chapolas en las fundas de vivero asegurando que la raíz quede extendida y apretada, se procedió a ubicarlas en la base del invernadero, garantizando que las fundas queden totalmente verticales para evitar un desarrollo incorrecto de las plantas.</p>	

*Nota.* Se presentan las etapas de preparación, manejo y siembra de chapolas de café.

### 6.2.3. *Propuesta de control para automatización de invernadero de almácigo de café de especialidad*

**6.2.3.1 Ventilación.** La regulación de ventilación en el invernadero es necesaria para mantener las condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas, controlando la temperatura, la humedad a través de la renovación del aire. En base a ello para realizar la renovación del aire, se considera el volumen del invernadero, la cantidad de renovaciones por hora según la temperatura, y cantidad de ventiladores y/o extractores, por mencionar los aspectos más importantes. En base a lo descrito, la renovación de aire que se debe realizar en el invernadero para las temperaturas alcanzadas es de 60 a 70 renovaciones en una hora, por lo que se necesita un caudal de  $76,507 \text{ m}^3/h$  que vendrá a ser cubierto por el ventilador de la marca SIAU con un grado de protección IP55, rango de operación de  $-50$  a  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , con un caudal de  $203,88 \text{ m}^3/s$  y dos extractores de aire de  $150 \text{ m}^3/s$ . El sistema de ventilación fue de tipo mecánico simple, complementado con ventilación natural. Su objetivo fue realizar un barrido del aire del interior y renovarlo con aire del exterior, lo que contribuyó a mejorar las condiciones de temperatura y humedad. Este sistema de ventilación, no es un sistema de refrigeración, es decir, el alcance máximo que se puede lograr con este sistema es la temperatura y humedad del exterior. No se optó por un sistema de refrigeración, ya que las condiciones climáticas en la provincia de Loja no son muy críticas, además del coste energético y su inversión, lo que no representaría rentabilidad.

Además es importante mencionar que según Group, 2016 “La temperatura interior en un día soleado, será de 5,5 a 6,5 °C por encima de la exterior con 45 renovaciones/hora y de 4,5 a 5,5 °C con 60 renovaciones/hora.” En el anexo 7 se muestran las características del ventilador axial y su diseño en la **Figura 26**.



**Figura 26.** Ventilador axial IP55

Fuente: Tomado de SIAU, 2024.

**6.2.3.2 Monitoreo de temperatura y humedad ambiente.** El módulo sensor DHT22 AM2302 permite monitorear la temperatura y la humedad relativa del ambiente. En base a este sensor se puede cumplir con los requerimientos básicos de control en un invernadero. La temperatura es uno de los factores más críticos para el desarrollo del café, con un rango adecuado de 22 a 26 °C, aunque el rango mínimo es de 10 °C y el máximo de 32 °C, donde fuera de estos rangos el crecimiento es nulo. La humedad influye en el crecimiento, la transpiración de las plantas y el desarrollo de enfermedades cuando es excesiva, por lo que se debe garantizar una humedad del 65 a 80%. Este sensor se colocó a la altura de las hojas de las plantas, en la parte lateral izquierda del invernadero con la finalidad de obtener los valores más cercanos de los que percibe la planta y sensar los valores más críticos debido a la irradiación solar. Los datos recogidos por el sensor se integrarán en el sistema de control, lo que permitirá hacer ajustes dinámicos en la ventilación y el riego. En el anexo 7 se muestran algunas características técnicas del módulo sensor DHT22 y se ilustra en la **Figura 27**.



**Figura 27.** Módulo sensor DHT22 (AM2302)

Fuente: Tomado de ELECTRONICS, s.f.

**Sensor de humedad del suelo.** El control de la humedad del suelo es crucial durante la fase de almácigo del café, ya que, si el sustrato es demasiado seco, puede generar estrés hídrico, limitando el desarrollo de la planta. Por otro lado, un exceso de humedad puede conllevar a enfermedades fúngicas y pudrición de las raíces. Para medir y controlar la humedad del suelo, se utilizaron dos sensores de humedad de suelo (Higrómetro HD-38) distribuidos estratégicamente dentro del invernadero para obtener datos representativos cuyo objetivo es mantener la humedad en un rango de 60 a 70 %. El sistema de riego se ha programado para evaluar la humedad del suelo cada una hora, con el fin de que, si el nivel es inferior al adecuado, se active el sistema de riego durante un minuto. Este enfoque busca asegurar un riego adecuado sin ser excesivo. En el anexo 7 se presentan las características y especificaciones del módulo sensor de humedad de suelo HD-38. Es importante mencionar que la salida A0 es una salida analógica que proporciona una tensión proporcional al nivel de humedad, mientras que el D0 es una salida digital que permite ajustar el umbral en el que el nivel lógico en esta salida cambia de bajo a alto mediante un potenciómetro. En la **Figura 28**, se observa el higrómetro HD-38.



**Figura 28.** Módulo sensor de humedad del suelo HD-38 anticorrosivo)

Fuente: PLEXYLAB, s.f.

**6.2.3.3 Sistema de riego.** Se implementó un sistema de riego por atomización, para distribuir el agua de manera uniforme y precisa, según las condiciones programadas previamente en el sensor de humedad de suelo. El sistema de riego cuenta con cuatro boquillas de aspersión, distribuidas de manera uniforme para abarcar toda el área de cultivo. Dado que las boquillas para funcionar correctamente necesitan una presión de 2 a 12 bar para funcionar correctamente, se instaló una minibomba de diafragma de alta presión, que bombeará agua desde un depósito hacia el sistema de riego por atomización, manteniendo una presión de 5.86 bar. En el anexo 7 se muestran las características de la minibomba de diafragma de alta presión y en en la **Figura 29** se aprecia la minibomba de diafragma junto a las boquillas de riego por atomización.



(a) Bomba pulverizadora autocebante.

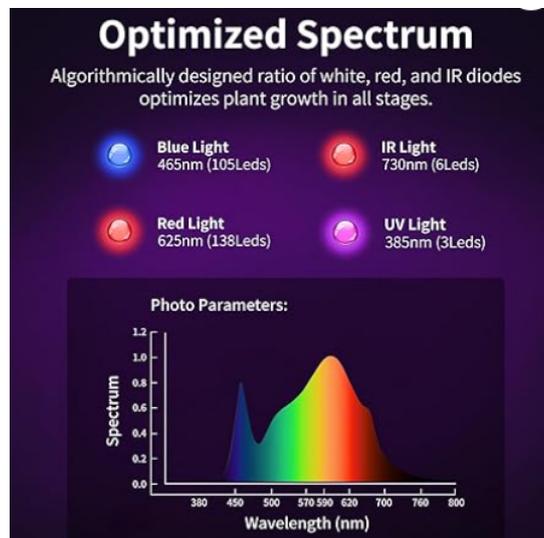


(b) Boquillas para riego por atomización.

**Figura 29.** Sistema de riego por atomización.

Fuente: ELECTRONICS, s.f.

**6.2.3.4 Luz led de cultivo.** Con la finalidad de imitar el espectro solar y promover el crecimiento saludable de las plantas, se empleó una lámpara para cultivo LED con espectro UV-IR. Para Massa et al., 2008 la luz UV ayuda a estimular la producción de compuestos protectores en las plantas, mientras que, la luz IR es esencial para la fotosíntesis y el crecimiento celular. El espectro de la lámpara se ilustra en la **Figura 30**.



**Figura 30.** Espectro de lámpara de cultivo UV-IR

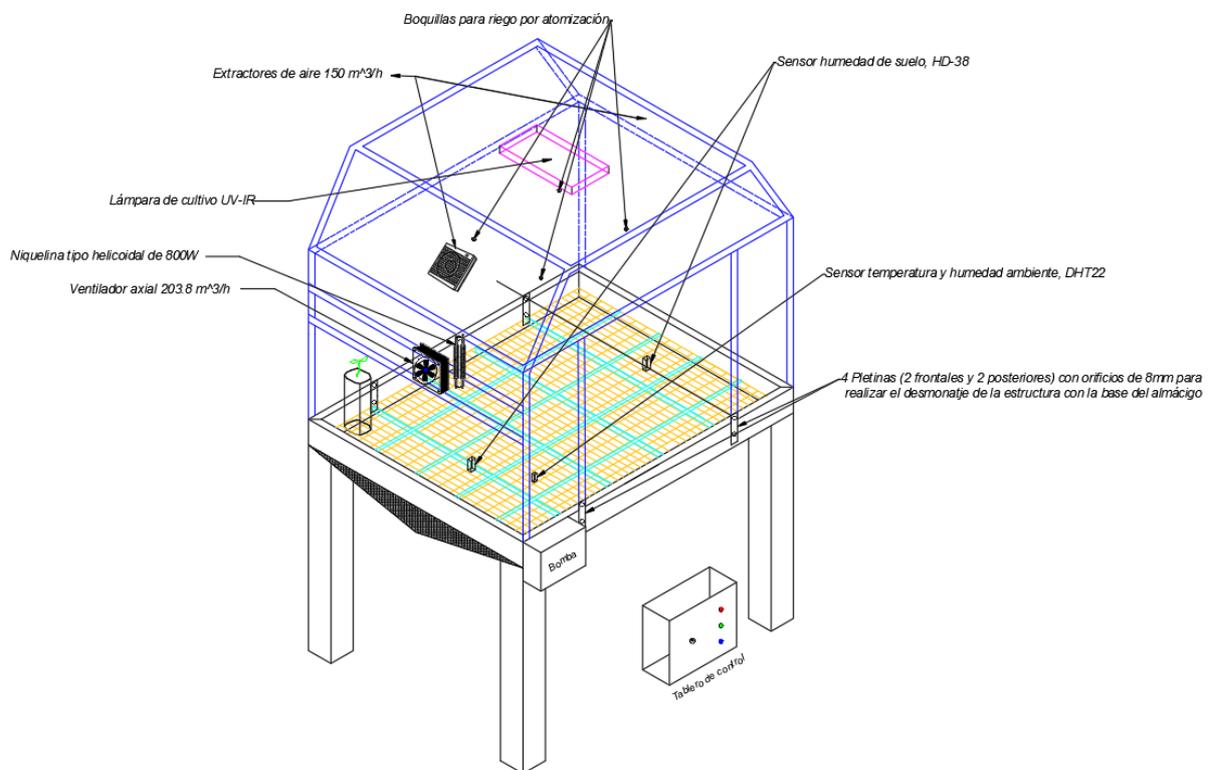
Fuente: Electrostore, s.f.

Los sensores y actuadores se colocaron en lugares estratégicos para optimizar el control del microclima dentro del invernadero.

- El sensor DHT22 se situó a la altura de los colinos de café para obtener mediciones representativas.

- Los higrómetros HD-38 se colocaron en las partes centrales exteriores, donde las plantas son más susceptibles a cambios.
- Las cuatro boquillas para riego por atomización se colocaron para cubrir uniformemente la superficie del invernadero.
- La lámpara de cultivo se instaló en la parte central a 70 cm de la base del invernadero, según las especificaciones del fabricante.
- El ventilador se colocó en una pared lateral, en la dirección de los vientos predominantes, para facilitar la circulación natural del aire y los dos extractores de aire se colocaron en la partes superiores del invernadero.

En la **Figura 31** se observa la distribución de sensores y actuadores.



**Figura 31.** Propuesta para montaje de sensores y actuadores

En la **Figura 32** se aprecia los resultados del montaje de sensores y actuadores cuya finalidad es automatizar para cumplir con el control de las variables para el desarrollo del café.



(a) Prototipo automatizado para almácigo de café de especialidad

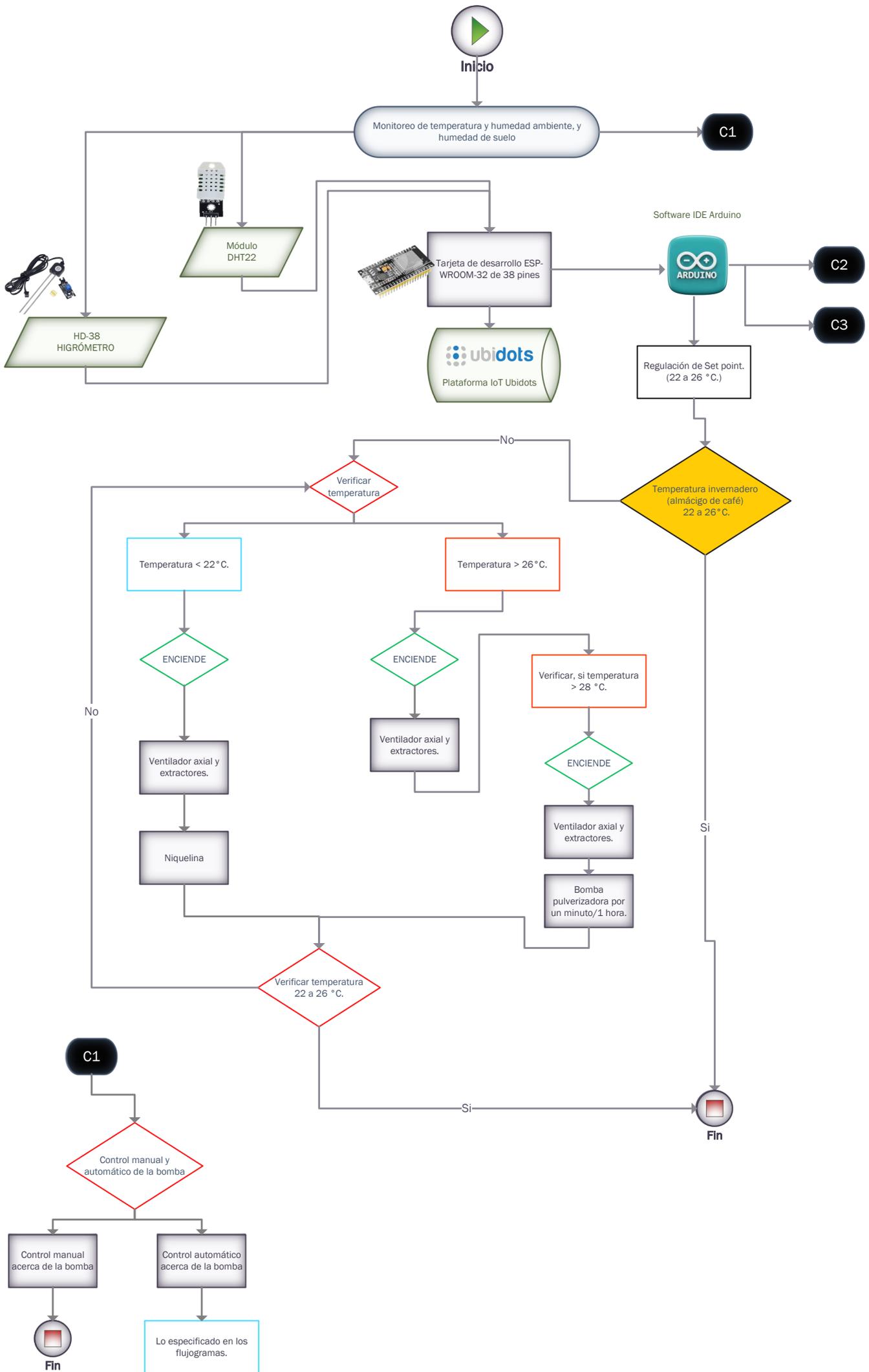


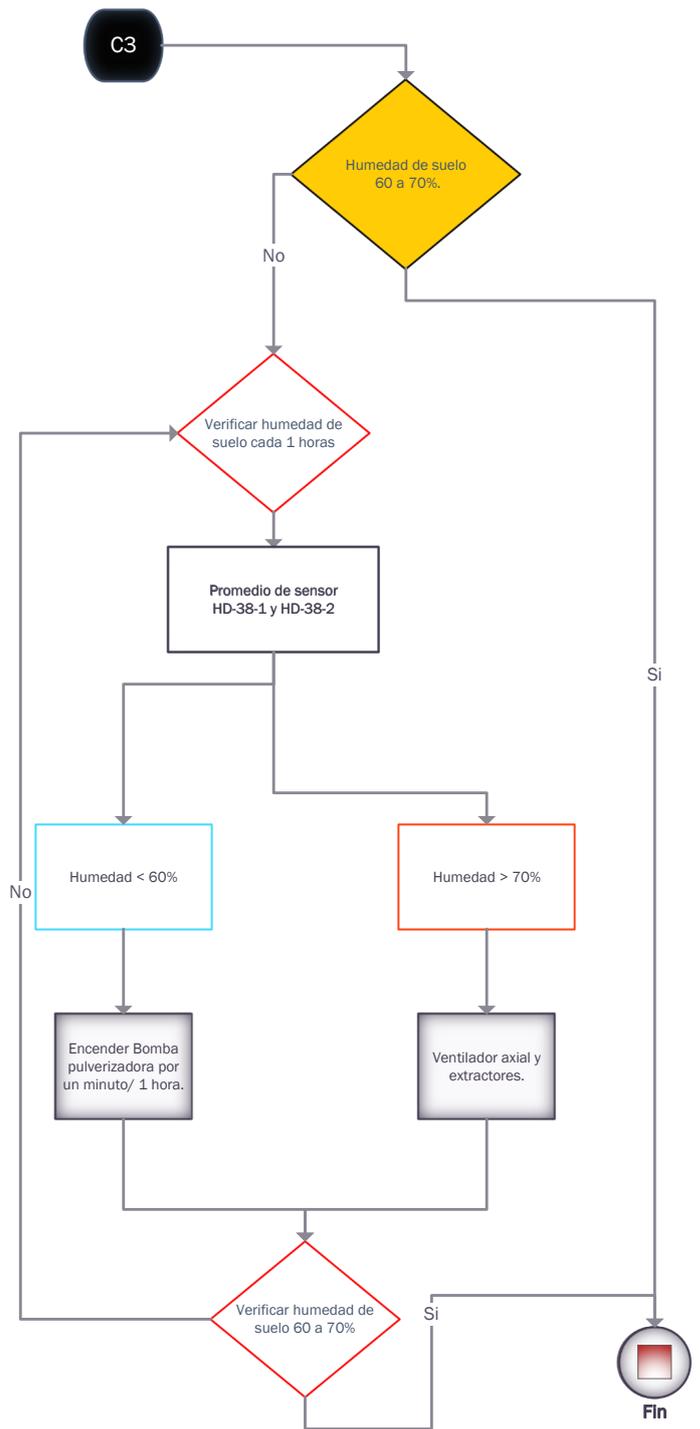
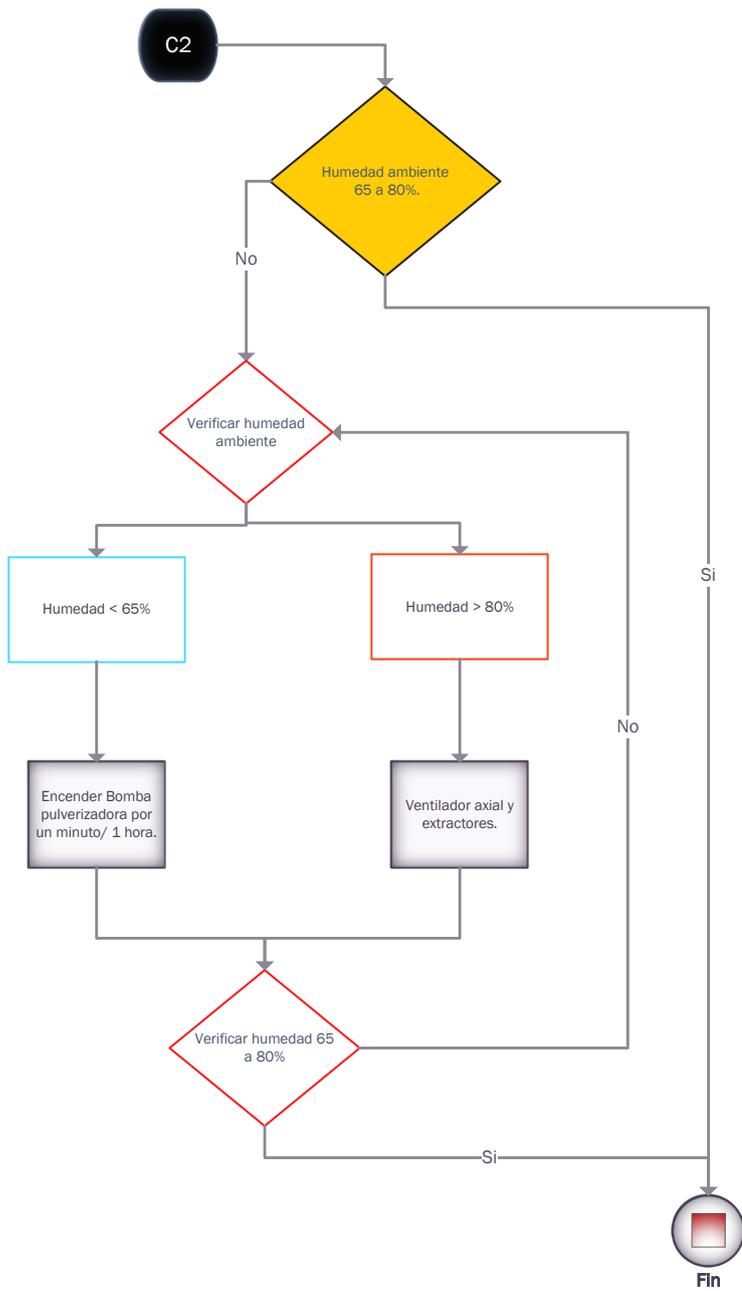
(b) Prototipo automatizado cubierto con polisombra al 80 %

**Figura 32.** Prototipo automatizado para almácigo de café.

**6.2.3.5 Flujograma de control.** Para realizar el control sobre el invernadero para almácigo de café, se ha diseñado el siguiente flujograma. Es importante mencionar que el control automatizado será ON-OFF, es decir, en función de los valores monitoreados, se encenderán o apagarán las salidas (controladores). En el flujograma se indican los valores de temperatura, humedad ambiente y humedad del suelo, que son las variables de entrada. Los valores recogidos por el módulo sensor DHT22 son digitales, mientras que los valores del módulo sensor HD-38 son analógicos. Estos datos fueron procesados por una tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM de 38 pines que actúa como el controlador.

Es importante mencionar que la temperatura es uno de los factores que más influye en el desarrollo de la planta. En base a ello, el sistema automatizado, programado en el IDE de Arduino busca mantener la temperatura adecuada para el crecimiento, la cual se mantiene en un rango de 22 a 26 °C, con una humedad ambiente de 65 al 80 %, y una humedad de suelo de 60 al 70 %. El control interno en el invernadero se evaluará cada 30 segundos lo que permite actuar en el ventilador, nebulina, luz de espectro para plantas, mientras que la bomba lo hará cada una hora por un minuto en base a las necesidades. Pero por qué el riego por nebulización no se lo puede realizar como los otros actuadores cada 30 segundos? Porque en la etapa de almácigo el café es muy propenso a desarrollar enfermedades fúngicas y pudrición de sus raíces por exceso de humedad. Por otro lado, el envío de datos a Ubidots se realizó cada seis minutos en función de límite de datos que puede almacenar una cuenta gratuita en un mes.





En base al flujograma anterior se presenta la automatización para el control de las variables que incluye un ventilador axial IP55 de  $203,88 \frac{m^3}{h}$  y dos extractores de  $150 \frac{m^3}{h}$  que permite la renovación de aire 70 veces en una hora, niquelina en espiral de 800 W para regular la temperatura con un salto térmico de 12 °C, en un tiempo de media hora, y el sistema de riego que viene compuesto por una bomba pulverizadora de  $4,5 \frac{L}{min}$ , presión de 5,86 bar y boquillas para nebulización que su presión para su correcto funcionamiento que va desde los 2 a 12 bar. Con lo antes mencionado se presentó el siguiente sistema de control.

### **Control de temperatura para el desarrollo de plantas de café en etapa de almácigo.**

- Temperatura adecuada para el desarrollo en la etapa de almácigo de 22 a 26 °C.
- Si temperatura es menor a 23 °C, se enciende sistema de ventilación forzada y niquelina hasta alcanzar la temperatura adecuada.
- Si temperatura es mayor a 25 °C, se enciende sistema de ventilación hasta hacer un barrido de la temperatura interna y renovarla con la exterior.
- Si la temperatura continúa aumentando continúa trabajando el sistema de ventilación forzada, pero además se enciende la bomba pulverizadora por el tiempo de un minuto y para su posterior encendido se necesita que transcurra una hora.
- Si temperatura se encuentra dentro del rango adecuado los actuadores permanecen apagados.

### **Control de humedad ambiente para el desarrollo de plantas de café en etapa de almácigo.**

- Si humedad es menor a 65 %, se enciende bomba pulverizadora por un minuto, pero si las condiciones siguen siendo críticas el próximo encendido se realizará luego de pasar un hora para evitar riego excesivo, además del tiempo en que el sensor sistema se estabiliza.
- Por otro lado, si humedad es mayor a 80 % se enciende el sistema de ventilación forzada.
- Si la humedad se encuentra dentro de los rangos adecuados los actuadores permanecerán apagados.

### **Control de humedad de suelo para el desarrollo de plantas de café en etapa de almácigo**

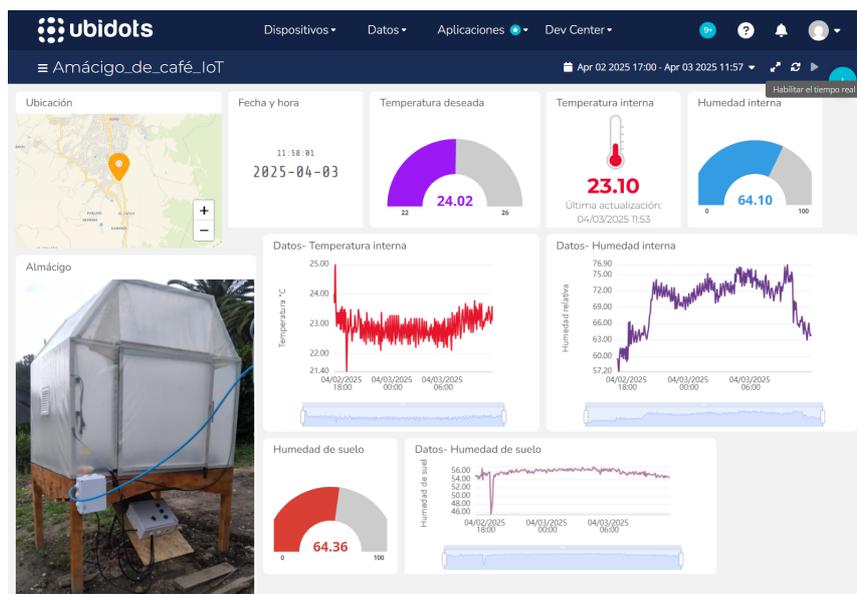
- Se saca un promedio entre los sensores HD-38 y se evalúa la humedad cada 1 hora con la finalidad de evitar humedad excesiva propicia para enfermedades fúngicas.

- Si humedad es menor a 60 % se enciende bomba pulverizadora por un minuto.
- Si humedad es mayor a 70 % se enciende el sistema de ventilación, puede funcionar de forma continua.

Los datos recolectados por los sensores DHT22 y HD-38 fueron enviados a una placa de desarrollo, la cual controlará el encendido y apagado de las salidas según los parámetros establecidos en la programación. La placa de desarrollo ESP32-DEVKITC de 38 pines de Espressif Systems, cuenta con comunicación inalámbrica WiFi y Bluetooth con un procesador de 32 bits de doble núcleo. Esta placa estará conectada a la plataforma IoT Ubidots mediante WiFi bajo el protocolo de comunicación MQTT, donde se almacenarán los datos para su control y monitoreo de forma remota.

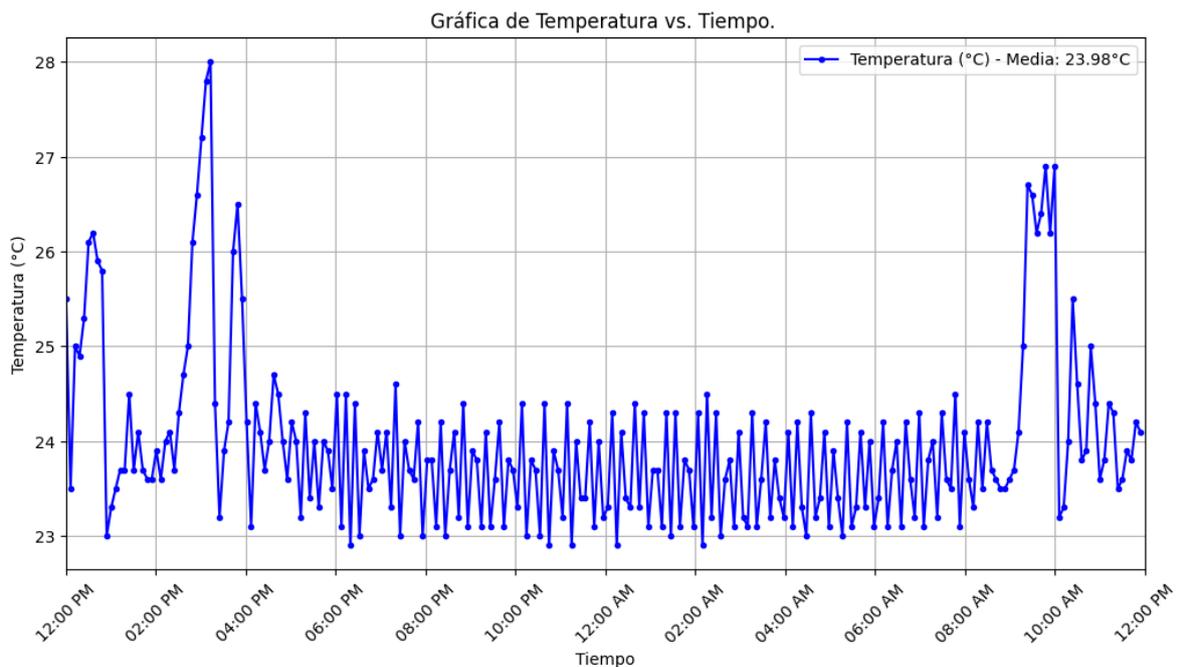
La comunicación MQTT es un protocolo de mensajería ligero que permite la comunicación entre dispositivos y aplicaciones IoT, basado en el modelo de publicación-suscripción, permite comunicación bidireccional. Su capacidad de comunicación bidireccional es crucial para este proyecto, ya que, al tener una conectividad a internet limitada en el invernadero este protocolo destaca por ser ligero y eficiente en cuanto al uso de ancho de banda, convirtiéndolo en una opción ideal para aplicaciones IoT en la agricultura. Además, la arquitectura de publicación-suscripción de MQTT permite una comunicación asincrónica y robusta, asegurando que el sistema de control del invernadero pueda operar independientemente de la estabilidad de la conexión a Internet.

En el anexo 2 se aprecia el diagrama de conexión entre la placa de desarrollo, los sensores y actuadores y la parte de potencia para el control del invernadero para almácigo de café. Los datos registrados por los sensores se enviarán a la nube para obtener un control desde cualquier parte del mundo con acceso a internet. (Ver la **Figura 33**)



**Figura 33.** Plataforma IoT del almácigo de café desarrollada en Ubidots

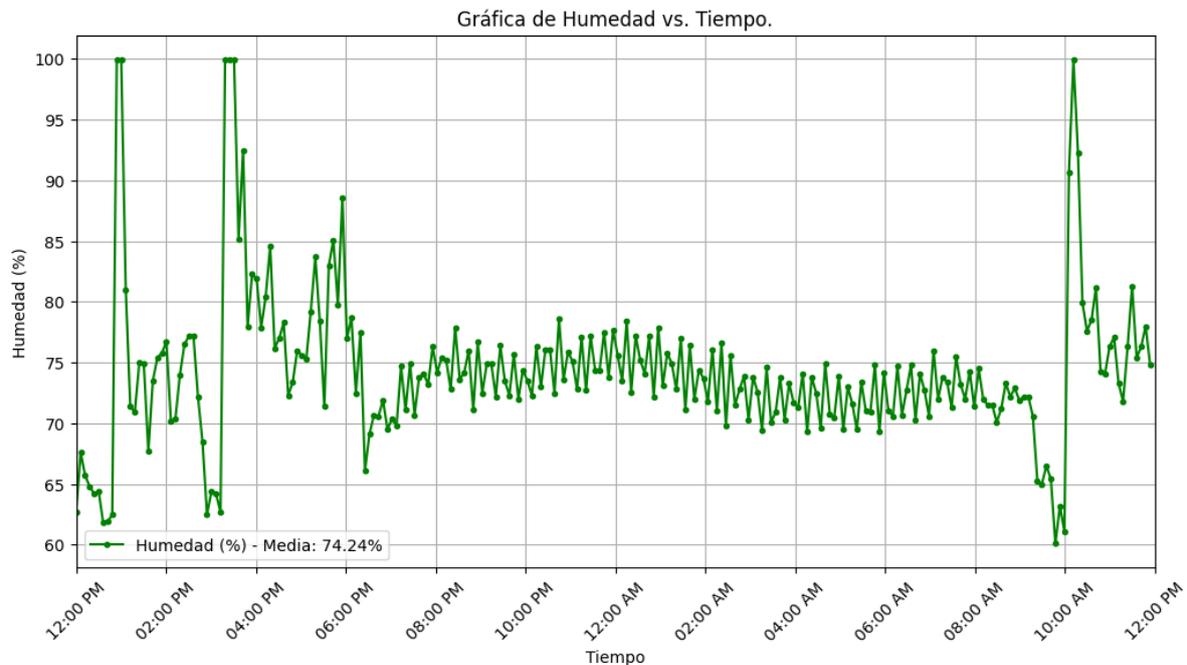
Según Arcila y Cenicafé (2007), la temperatura adecuada para el crecimiento de la planta de café se encuentra alrededor de los 22 a 26 °C, y con un límite inferior de 10 °C, y un límite superior de 32 °C, si se sobrepasa estos límites el crecimiento es nulo, además de ser unos de los factores que más influyen en el desarrollo. En la **Figura 34** se aprecia el funcionamiento del sistema de control para la temperatura interna del invernadero en un día donde la temperatura promedio alcanzada en la noche fue de 11,8 °C y de 19,7 °C en el día. Como se aprecia en la figura los picos donde se alcanza la temperatura más alta es durante el día, donde existe una radiación solar global promedio de  $750 \frac{W}{m^2}$ , que es donde se activa el sistema de ventilación para tratar de disminuir dicha temperatura para mantenerla menor a 26 °C, pero si sobrepasa los 28 °C, se enciende el sistema de nebulización por un minuto para mantenerla en los rangos adecuados, por otro lado, en la noche donde existen corrientes de aire frío de alrededor 11.8 °C se enciende el sistema de calefacción (niquelina) que compensa dichas temperaturas, con ello la temperatura promedio dentro del invernadero es de 23.98 °C, muy cercana a la deseada en el setpoint de 24 °C.



**Figura 34.** Funcionamiento del sistema de control para mantener la temperatura adecuada dentro del almacigo

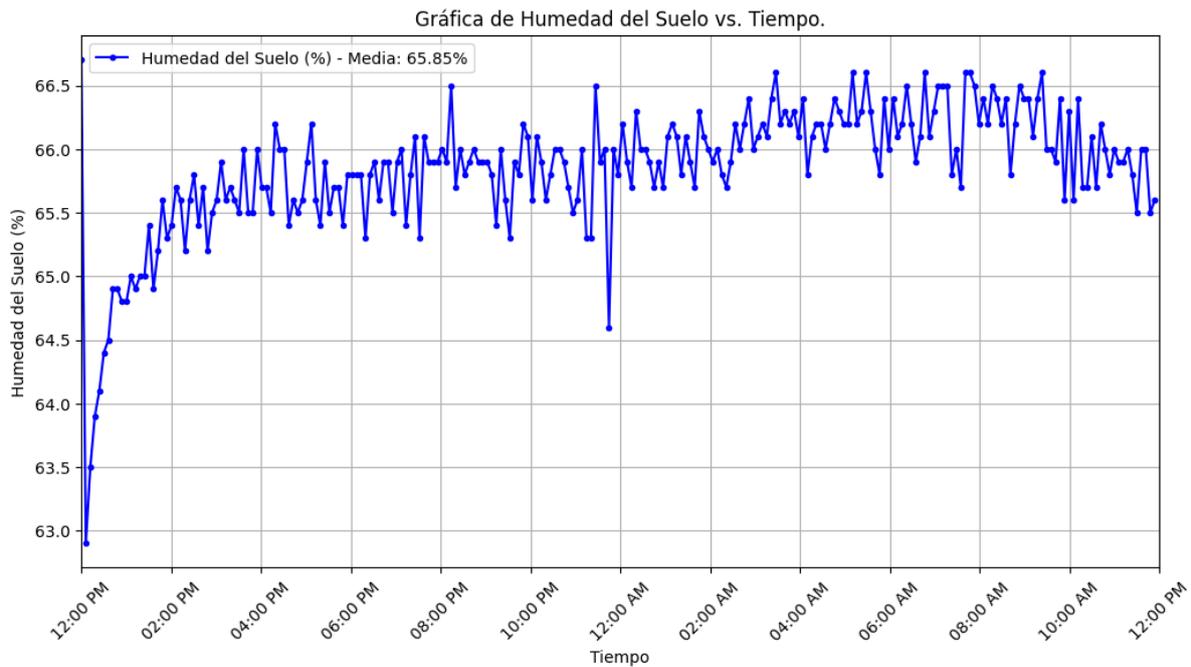
La humedad ambiente tiene implicaciones fisiológicas y agronómicas, donde contenidos elevados de humedad aumentan el riesgo de enfermedades fúngicas, reduce la transpiración y por ende la capacidad de absorción de agua y minerales, por otro lado, si la humedad es baja reduce los intercambios de  $CO_2$  y de vapor de agua lo que afecta la fotosíntesis y la regulación térmica. En base a ello la humedad que se pretende mantener dentro del invernadero para almacigo es del 65 al 80 %. En la **Figura 35**, la humedad

disminuye cuando la temperatura aumenta, pero en los casos donde existen picos elevados de alrededor del 100 % son cuando se inyecta riego por nebulización para mantener el sustrato con niveles de humedad adecuados o cuando la temperatura ha subido demasiado y se la pretende disminuir con este sistema, además en la noche se observa que los contenidos de humedad son más estables, en base a ello se mantiene una humedad de alrededor del 74,24 % de humedad ambiente.



**Figura 35.** Funcionamiento del sistema de control para la temperatura dentro del almácigo

La humedad del suelo es importante para el desarrollo de la planta, donde una humedad escasa puede causar estrés hídrico, donde la planta pierde la capacidad de realizar la fotosíntesis, la capacidad de transporte de nutrientes y la regulación térmica, mientras que un riego excesivo puede aumentar el riesgo de ataques por hongos o pudrición de raíces. En base a ello la **Figura 36** muestra el nivel de humedad del suelo en el sustrato, donde el nivel adecuado para el desarrollo de la planta está entre el 60 a 70 %, los sistemas para controlar la humedad del sustrato son el riego por nebulización y si es excesivo entra a funcionar ventilación, el control de humedad excesiva en el sustrato es más complicado de controlar, debido a que el sustrato se encuentra en fundas y se necesita que la ventilación vaya enfocado al sustrato. En base a lo mencionado, la humedad del sustrato se encuentra en un promedio del 65,85 %.



**Figura 36.** Funcionamiento del sistema de control para la temperatura dentro del almácigo

En el anexo 10, se observa la programación en el entorno de Arduino IDE para el control de las variables en el almácigo de café, es importante mencionar que el presente código realiza un reconexión a la red WiFi cuando se desconecte con la finalidad de evitar pérdidas de datos cuando la conexión a internet se pierda.

### 6.3. Caracterización y comparación de resultados entre almácigo automatizado y no automatizado.

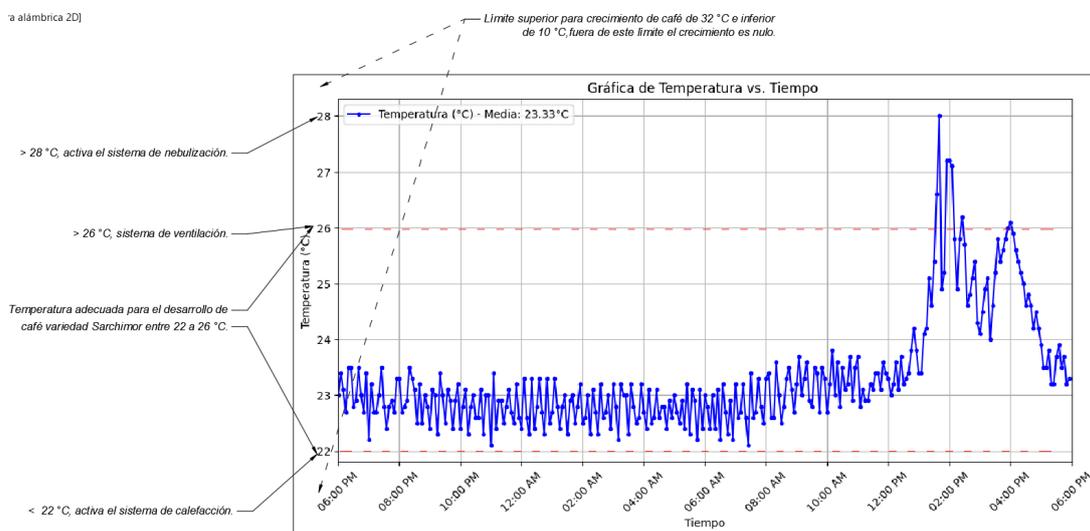
La caracterización y comparación de los dos tipos de almácigos, así como los resultados alcanzados en la planta de café durante el tiempo de estudio, fueron fundamentales para realizar una evaluación de los costos y beneficios que ofrecen. Para llevar a cabo esta caracterización y comparación entre los almácigos de café, se evaluaron los prototipos de almácigo de café y los resultados en la planta. Con esta comparativa se buscó validar la hipótesis general de la investigación: “El desarrollo de un prototipo automatizado de café de especialidad conducirá a un desarrollo más eficiente y exitoso de las plántulas de café de especialidad en comparación con el método tradicional no automatizado.” Algunas consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar la comparativa fueron:

#### 6.3.1. Caracterización y comparación entre prototipos para almácigo de café.

- **Evaluación de eficiencia de uso de recursos. (Consumo de agua, potencia de los equipos, tiempo en el cuidado del café)** El sistema de riego automatizado permitió un control de riego adecuado, según las necesidades de la humedad del sustrato, así como la necesidad de humedad ambiente, en donde se ocupa alrededor

de 4,5 L/min cuando se activa este sistema, con un consumo aproximado de 9 a 13,5 litros diarios dependiendo del día, ya que en días más calurosos necesita más cantidad de agua, por otro lado el método tradicional dependía de riegos manuales, el riego se realizó una vez por día, donde se llegó a consumir un aproximado de 8 a 18 litros diarios, lo que resultó en un uso de agua menos eficiente y a menudo excesivo o insuficiente, además de depender directamente de las condiciones climáticas del sitio.

En el prototipo automatizado se requirió consumo de energía a lo largo del desarrollo de la planta en el manejo de sensores, actuadores y controladores. En la **Figura 37** se muestra el comportamiento del sistema en el que el valor de referencia se ha colocado en  $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ , pero en la noche se alcanza un promedio de alrededor del  $22,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esto debido al tiempo en el que se realiza el control que es cada 30 segundos que es donde actúa el sistema de calefacción, mientras que si la temperatura está por encima de los  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  se enciende el sistema de enfriamiento, pero si sobrepasa los  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que es cuando existe un nivel alto de irradiación entra a funcionar el sistema de nebulización por un minuto para reducir dicha temperatura, como se observa en la gráfica las temperaturas más bajas que se registran en el invernadero para almácigo de café son en la noche, es ahí donde el sistema de calefacción opera con la finalidad de compensar dichas temperaturas.



**Figura 37.** Sistema de operación del control en los días 20 y 21 de julio de 2024.

Una vez analizado los datos de ese día se sacó la potencia real de cada elemento que influye en la calefacción o ventilación del sistema, 843 W para calefacción y 43 W para el sistema de ventilación, además el consumo de la bomba de 42 W cuando la temperatura supera los  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o cuando se necesite agregar humedad al sustrato, la temperatura promedio alcanzada durante las 24 horas fue de  $23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y una desviación estándar de 1,04. El mayor consumo de energía se da cuando se

requiere agregar calor al sistema, para ello se lo puede calcular como la potencia necesaria para subir a la temperatura adecuada y multiplicarla por las horas que se mantuvo activo y dividirla para mil para sacar el consumo en Kwh, es necesario aclarar que estos valores fluctúan debido al clima ambiental que influye directamente en el sistema. Por otro lado en el prototipo no automatizado si bien no implicaba consumo energético mas allá de la mano de obra la falta de optimización de otros recursos podría traducirse como un consumo energético.

El tiempo de trabajo es una de las variables en las que existió mayor diferencia, la automatización redujo significativamente el tiempo requerido para la supervisión y mantenimiento del almácigo, pero la construcción del invernadero, montaje y calibración de sensores duró un aproximado de dos semanas. Por otro lado, para el almácigo no automatizado su construcción duró un aproximado de 4 horas, pero durante el manejo y cuidado en el desarrollo se requirió una mayor cantidad de tiempo y mano de obra para realizar las tareas de riego, monitoreo y ajuste manual, además que las condiciones ambientales gobernaban el desarrollo del café, esto incrementó el costo laboral y redujo la eficacia en el desarrollo.

- **Evaluación costo- beneficio (Costos iniciales y operativos).** La evaluación de costos iniciales se desarrolló para realizar la comparativa a largo plazo, pues si bien en el almácigo automatizado los costos iniciales fueron más altos debido a la necesidad de adquirir sensores, sistemas de control, equipos automatizados y el desarrollo del invernadero. Sin embargo, estos costos pueden ser justificados por los ahorros a largo plazo y la mejora en la eficiencia y calidad del cultivo, además de que el sistema automatizado se lo puede llegar a utilizar consecutivamente. Por otro lado en el almácigo no automatizado los costos iniciales fueron significativamente menores, ya que no se necesitó invertir en equipos tecnológicos avanzados. Esto lo hace más accesible, pero con potenciales costos operativos mayores a largo plazo.

En la **Tabla 16** se muestra los costos de construcción para el almácigo automatizado, en precio total alcanza un valor de 766,79 dólares

**Tabla 16.** Costos de construcción de prototipo de almácigo automatizado

Cantidad	Elemento	Precio Unitario \$	Precio total \$
1	Tablón de madera de pino	15	15
1	Geomembrana de 750 um; 1m x 3m	15	15
4	Tubo cuadrado de aluminio de 1"	18,03	72,12
4	Tapa pequeña cuadrada 1"	0,25	1
10	Ancla plástica interna tubo 1"	0,18	1,8

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 16 – *Continúa desde la página anterior*

Cantidad	Elemento	Precio Unitario \$	Precio total \$
2	Nudos Tubo 1"	7,08	7,08
3	Plástico para invernadero de 200 um; 1m x 2,5	6	18
4	Polisombra al 80 % 1 x 2.10m	3,3	13,2
1	Ventilador axial IP55	45,11	45,11
1	Bomba de diafragma de alta presión	24,86	24,86
1	Luz UV-IR para plantas	66,32	66,32
2	Módulo de relé de 4 canales 5V	5,3	10,6
1	Higrómetro HD-38	6,5	6,5
2	Kit de riego por atomización	15	30
1	Placa de ruptura	25	25
1	DevKit ESP-WROOM-32	5,5	5,5
1	Concéntrico ST-THHN 3 x 12	1,85	1,85
2	Manguera de 1/2"	11,25	22,5
45	Conductor eléc. THHN #12 UNILAY	0,25	11,25
1	Caja de paso PVC 30 x 25 x 12	8,06	8,06
1	Caja de paso PVC 20 x 15,5 x 8	8,06	8,06
1	Tomacorriente	0,92	0,92
1	Enchufe 3P-15A-125V	2,91	2,91
1	Niquelina de 800 W	70	70
1	Selector 2 posiciones NA Metálico	2,61	2,61
1	Luz piloto CHINT 22 mm	1,42	1,42
1	Accesorios (pernos, pintura, remaches, tornillos, etc.)	25	25
1	Mano de obra por día	150	150
		<b>Precio total</b>	<b>766,79</b>

Por el contrario, en la **Tabla 17** se muestra los costos para la construcción de un almácigo no automatizado, mismo que ha sido diseñado para la misma cantidad de plantas, y con las mismas características de un vivero para café a escala, en el desarrollo de este prototipo se gastó un aproximado de 29,4\$

**Tabla 17.** Prototipo de almácigo no automatizado (forma tradicional)

Cantidad	Elemento	Precio Unitario \$	Precio total \$
4	Polisombra al 80 % 1m x 2,10m	2,15	8,6
1	Alambre de amarre #16	3	3
4	Tablas de 1,20 m x 0,2 m	0,7	2,8
1	Mano de obra por día	15	15
<b>Precio total</b>			<b>29,4</b>

Por otra parte, los costos operativos en el sistema automatizado se redujeron a largo plazo debido al uso eficiente de agua, y la reducción en la necesidad de mano de obra constante. Los mantenimientos regulares de los equipos automatizados representaron un costo, pero fueron menos frecuentes y menos intensivos que los métodos manuales. mientras que en el sistema tradicional los costos operativos fueron más altos en términos de consumo de recursos y mano de obra.

El estudio fue desarrollado en la ciudad de Loja, a una altura de 2100 m.s.n.m. Por lo que se deduce que la altitud influye notoriamente en el desarrollo de la planta en los almácigos, a medida que la altitud es mayor, el crecimiento, número de hojas y número de cruces es menor, por lo que viene bien realizar este tipo de inversión, para obtener colinos de café de mayor calidad y en menor tiempo.

### **6.3.2. Caracterización y comparación de los colinos de café**

Para realizar la caracterización y comparación en los colinos de café en ambos almácigos se ha utilizado un muestreo probabilístico simple, en donde se tiene 150 plantas de café en cada sistema, de ellos se buscó calcular un tamaño de muestra seleccionando el nivel de confianza, porcentaje de error, y la población total del universo. Esto con la finalidad de que los datos recolectados permitan hacer inferencias sobre toda la población. De ecuación 1 se calcula el tamaño en base a los siguientes parámetros.

- Nivel de confianza del 95 %
- Margen de error del 10 %
- Población 150
- Valor de k para un nivel de confianza del 95 % es 1.96

$$n = \frac{150 * 1,96^2 * 50 * 50}{10^2 * (150 - 1) + 1,96^2 * 50 * 50} = 59,79 \approx 60$$

Una vez obtenido el tamaño de muestra, se desea elegir los elementos de la muestra, para ello se usó un software que genere sesenta números aleatoriamente de la población de 150 plantas, sin que se repitan, en la **Figura 38** se observa la muestra de color rojo de la población de 150 plantas.

1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123	133	143
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145
6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146
7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147
8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108	118	128	138	148
9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150

**Figura 38.** Plantas de café enumeradas para escoger la muestra.

Una vez obtenidos los elementos de la muestra es necesario establecer las variables que se evaluaron, que son: Altura de la planta, diámetro de copa de la planta y problemas relacionados a enfermedades fitosanitarias y supervivencia al trasplante. De la evaluación se obtuvo los siguientes datos:

Número aleatorio para muestra de comparación	Almácigo automatizado				Almácigo no automatizado (forma tradicional)			
	Diámetro de copa de la planta mm	Altura de la planta mm	Enfermedades fitosanitarias		Diámetro de copa de la planta mm	Altura de la planta mm	Enfermedades fitosanitarias	
			Si	No			Si	No
30	56	70		x	52	50	x	
132	62	68		x	53	55		x
71	54	73		x	50	53		x
81	55	70		x	46	43		x
73	54	70		x	45	42		x
26	53	60		x	45	44		x
43	57	70		x	40	30		x
96	51	65		x	40	33		x
146	54	68		x	38	47		x
123	53	73		x	48	38	x	
101	55	73		x	45	52	x	
72	55	80		x	44	53		x
65	61	85		x	50	45		x
94	55	70		x	41	47		x
48	55	59		x	42	44	x	
61	58	65		x	51	46		x
31	70	73		x	43	53		x
105	50	80		x	39	48		x
36	65	70		x	52	53		x
23	60	80		x	47	49		x
100	60	80		x	46	64	x	
8	60	80		x	45	55		x
57	62	85		x	50	47	x	
144	60	65		x	49	61		x
112	57	85		x	47	49		x
89	60	75		x	49	47		x
76	57	83		x	46	52		x
24	60	82		x	52	62		x
35	62	77		x	53	47	x	
137	55	79		x	45	57		x
113	60	81		x	51	46		x
110	63	83		x	51	51		x
50	57	84		x	48	54	x	
99	59	81		x	41	53		x
28	63	79		x	47	51		x
128	64	78		x	44	56		x
13	57	76		x	46	48	x	
40	59	83		x	48	47		x
68	62	79		x	38	57	x	
39	65	81		x	39	49		x
130	58	79		x	46	49		x
149	63	78		x	43	54		x
143	64	83		x	47	38	x	
142	66	79		x	56	55		x
93	57	84		x	49	47		x
67	61	83		x	46	53		x
140	58	85		x	47	47		x
136	61	81		x	51	61		x
59	59	79		x	39	49	x	
12	67	83		x	53	59		x
79	65	79		x	44	58		x
32	63	76		x	48	52	x	
49	59	82		x	47	53		x
111	58	77		x	38	47		x
121	64	84		x	43	47	x	
145	63	81		x	48	39		x
45	59	83		x	47	42		x
87	63	79		x	55	51		x
56	64	78		x	53	39	x	
104	59	82		x	48	56		x
<b>Promedio</b>	59,43	77,22	<b>Porcentaje</b>		46,57	49,57	<b>Porcentaje</b>	
<b>Desviación estándar</b>	4,13	6,45	0%	100%	4,50	6,76	23,3%	76,7%
<b>Máximo</b>	70,00	85,00			56,00	64,00		
<b>Mínimo</b>	50,00	59,00			38,00	30,00		

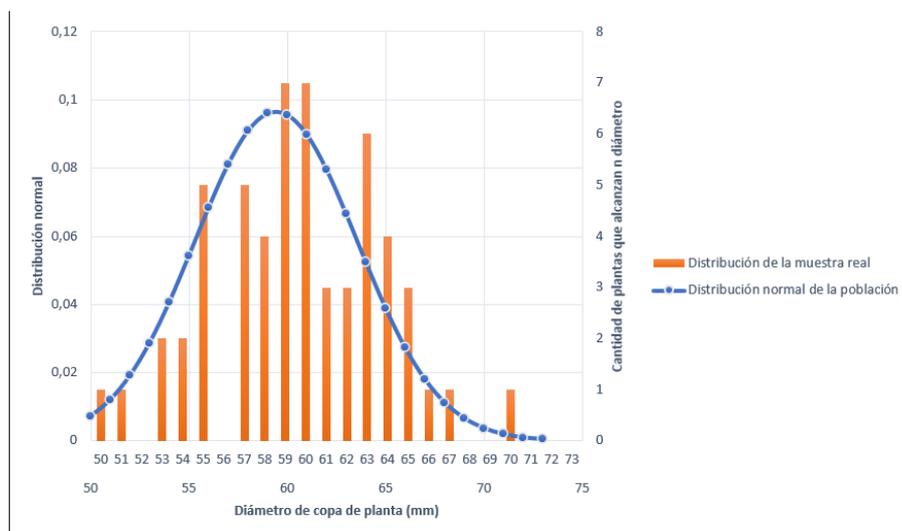
Para evaluar si los datos de altura y diámetro de copa de la planta siguen una distribución normal, se ha realizado la prueba de Kolmogorov-Smirnov. En base a ello se plantea.

- $H_0$  Si el p-valor  $>0.05$ , no se rechaza la hipótesis de normalidad.
- $H_A$  Si el p-valor  $<0.05$ , se rechaza la normalidad.

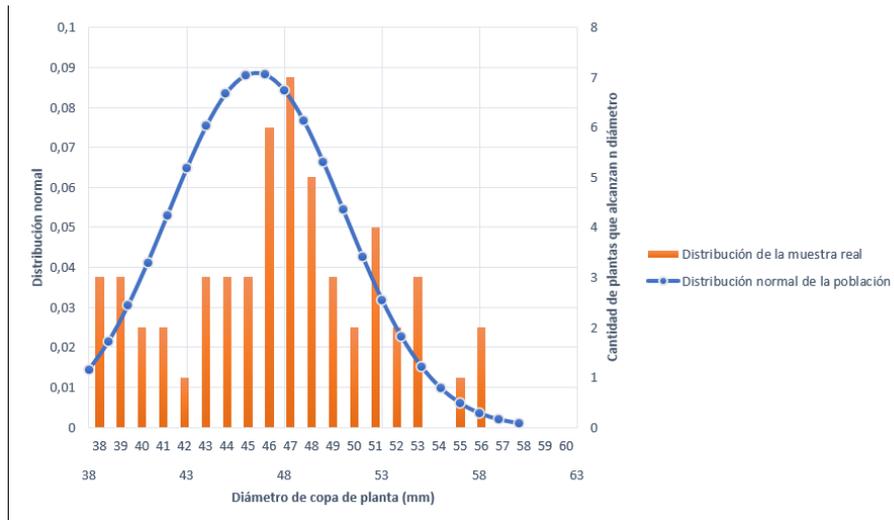
Variable	Kolmogorov-Smirnov p-valor	Conclusión
<b>Prototipo Automatizado.</b>		
Diámetro de copa de planta	0,8624	$p >$ , aceptamos la hipótesis $H_0$ . Se asume que la distribución de los datos es normal.
Altura de planta	0,02066	$p <$ , rechazamos la hipótesis $H_0$ . Se supone que la distribución de los datos no es normal.
<b>Prototipo No Automatizado</b>		
Diámetro de copa de planta	0,7694	$p >$ , aceptamos la hipótesis $H_0$ . Se asume que la distribución de los datos es normal.
Altura de planta	0,3379	$p >$ , aceptamos la hipótesis $H_0$ . Se asume que la distribución de los datos es normal.

**Tabla 18.** Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para normalidad

En la **Figura. 39 y 40**, se observa el comportamiento de la distribución normal que ocupan las muestras de los valores de diámetro de copa de plantas en el prototipo automatizado y tradicional, en el que el diámetro de copa en el sistema automatizado alcanza un valor de 59,43 mm y una desviación estándar de 4,13, mientras que en el sistema tradicional se alcanza una diámetro de 46,57 mm y una desviación de 4,5. Además, se observa que estos valores tienden a crecer a la derecha.

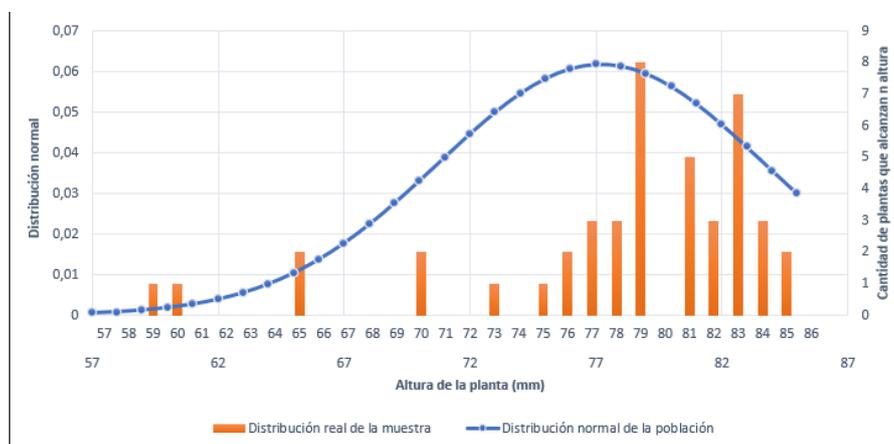


**Figura 39.** Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de planta (Automatizado).

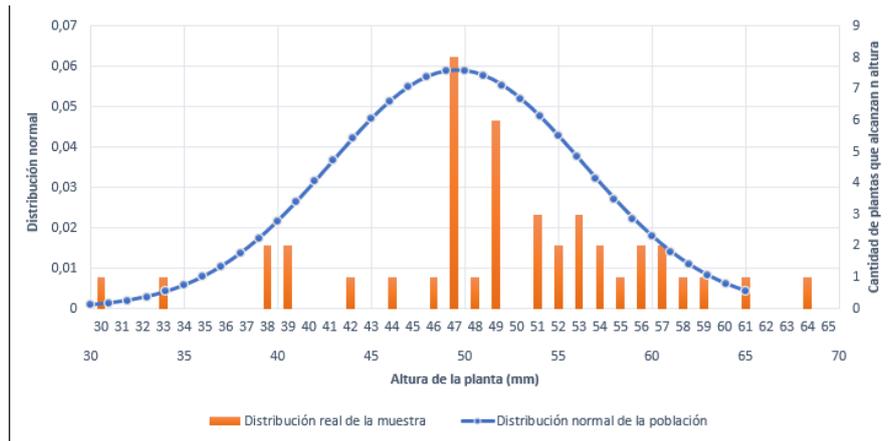


**Figura 40.** Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de la planta (No Automatizado).

Por otro lado, en la **Figura 41** se puede observar que la distribución no es normal y que alcanzó una altura promedio de la planta de 77,22 mm con una desviación estándar de 6,45, mientras que la **Figura 42** su distribución si es normal, y alcanza un promedio de 49,57 mm y una desviación estándar de 6.76. Es importante mencionar que el 0 % de las plantas a sufrido problemas fitosanitarios o de muerte temprana en el prototipo automatizado, mientras que el tradicional presenta problemas en alrededor de 23,3 %



**Figura 41.** Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (Automatizado).



**Figura 42.** Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (No Automatizado).

Luego de haber realizado el análisis de variables en los promedios del diámetro de copa de la planta y la altura se hizo uso de la prueba de T de Student para los diámetros de copa pues siguen una distribución normal, mientras que la distribución es anormal en la altura de la planta en el sistema automatizado, por lo que se realizó la prueba de Mann-Whitney.

### Definición para la prueba de hipótesis T de student

- Hipótesis Nula ( $H_0$ ): Los promedios de los diámetros de copa no poseen diferencia significativa.
- Hipótesis Alternativa ( $H_a$ ): Existe una diferencia significativa entre los promedios de los diámetros de copa.

**Cálculo estadístico ( $t$ ).** Se empleó la fórmula del t-test para muestras independientes:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (9)$$

Datos para diámetro de copa de plantas:

- |                          |                       |                      |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| • Promedio de los grupos | • Desviación estándar | • Tamaños de muestra |
| – $\bar{X}_1 = 59,43$    | – $s_1 = 4,13$        | – $n_1 = 60$         |
| – $\bar{X}_2 = 46,56$    | – $s_2 = 4,5$         | – $n_2 = 60$         |

Se sustituye los valores en la fórmula:

$$t = \frac{59,43 - 46,56}{\sqrt{\frac{4,13^2}{60} + \frac{4,50^2}{60}}} \approx 16,32$$

### ***Determinación de región de rechazo***

Para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$  y con 118 grados de libertad ( $n_1 + n_2 - 2$ ), el valor crítico t para una prueba de dos colas es aproximadamente 1.98. (Ver **Figura 62**)

### **Definición para la prueba de hipótesis U Mann-Whitney .**

- Hipótesis Nula ( $H_0$ ): No hay diferencia significativa entre las alturas de las plantas del prototipo automatizado y el tradicional.
- Hipótesis Alternativa ( $H_a$ ): Hay una diferencia significativa entre las alturas de las plantas del prototipo automatizado y el tradicional.

La prueba U Mann-Whitney es el equivalente no paramétrico de la prueba t para muestras independientes, existe una diferencia muy importante entre estas pruebas, donde la prueba de t comprueba si existe una diferencia de medias para las muestras y comprueba si difieren significativamente. Por otra parte, la prueba U Mann-Whitney comprueba si existe una diferencia en la suma de rangos, donde no es necesario que los datos se distribuyan normalmente. La ecuación 10, muestra el cálculo estadístico U para dos muestras.

$$U1 = n1 * n2 + \frac{n1(n1 + 1)}{2} - R1 \quad (10)$$

Donde n1 y n2 son los tamaños respectivos de cada muestra; R1 y R2 es la suma de los rangos.

$$U1 = 60 * 60 + \frac{60(60 + 1)}{2} - 5421,5 = 8,5$$

$$U2 = 60 * 60 + \frac{60(60 + 1)}{2} - 1838,5 = 3591,5$$

El estadístico U se define como el mínimo de U1 y U2, en este caso 8.5. Para  $n1 > 20$  y  $n2 > 20$ , bajo  $H_0$ , la distribución de  $U_i$  se aproxima a una normal

$$Z = \frac{U - \frac{n1*n2}{2}}{\sqrt{\frac{n1*n2(n1+n2+1)}{12}}} = -0,3198$$

$\alpha = 0,05$ ; Ahora el valor crítico se calcula como la inversa de la distribución normal estándar, 1,96. En base a ello el valor absoluto  $Z=0,3198$  debe ser mayor al valor crítico 1,96 para rechazar la hipótesis nula.

En conclusión el valor aleatorio de la población del grupo automatizado se considera distinto del valor aleatorio de la población del grupo no automatizado. En otras palabras, la diferencia entre el valor aleatorio de las poblaciones del grupo automatizado y del grupo no automatizado es lo suficientemente grande como para ser estadísticamente significativa.

- **Estado sanitario y Tasa de supervivencia al trasplante:** Para evaluar este criterio se registró la cantidad de colinos que no sobrevivieron al trasplante después del tiempo de un mes en los dos sistemas de almácigo para café, en base a ello se pudo evidenciar que fue el mayor problema para el caso del prototipo no automatizado, ya que el 23,3% plantas de café se vieron afectadas, ya sea por el hongo *Phoma spp* que causa problemas en altitudes mayores a 1600 m.s.n.m. y que se ve favorecido por corrientes fuertes de aire frío, también se vieron perjudicados por infecciones de hongos de la familia *Fusarium*, mismo que ataca principalmente al tallo, pudriéndolo o que presente coloraciones púrpuras, una vez afectado lo mas conveniente es eliminarlo ya que no hay forma de corregir este problema (Gaitán et al., 2011), también se presentaron problemas de mancha de hierro causadas por el hongo *Cercospora coffeicola* que se manifiesta como lesiones café oscuras en las hojas y en el tallo. (Gaitán et al., 2011). Por otro lado en el almácigo no automatizado no se presentaron este tipo de enfermedades.



(a) Síntomas en el cuello de raíz, afectado por hongos de la familia *Fusarium*



(b) Colino de café afectado por el hongo *Phoma spp*

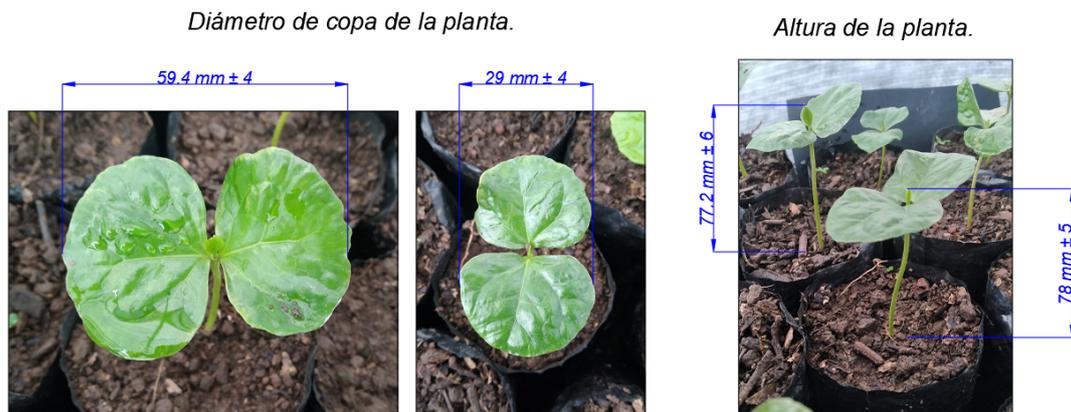
**Figura 43.** Colinos de café afectados por hongos en el prototipo no automatizado.

En la **Figura 44** se muestra una planta del almácigo atacada por el hongo *Cercospora coffeicola*. Por otro lado en el almácigo de café automatizado no se presentaron ningún problema de este tipo.



**Figura 44.** Planta de almácigo no automatizado atacada por mancha del hierro.

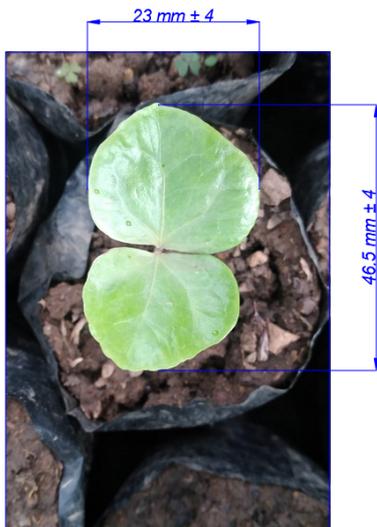
- **Altura de la planta y diámetro de copa de la planta.** El tamaño del tallo y el diámetro de copa de la planta es un indicador del desarrollo y la salud de la planta, las condiciones ambientales que determinan el crecimiento del tallo y las hojas son: luz, temperatura, humedad de suelo y nutrientes, en este caso se trabajó con las tres primeras variables para realizar una comparativa del desarrollo de la planta, en la **Figura 45** se muestra el desarrollo del diámetro de copa de planta con valores de  $59,4 \text{ mm} \pm 4$ , mientras que el tamaño del tallo alcanzó valores de  $77,2 \text{ mm} \pm 6$ .



**Figura 45.** Altura y diámetro de copa de la planta en el ambiente automatizado.

Por otra parte, en el ambiente no controlado el diámetro de la copa de la planta, así como el desarrollo del tallo se ve afectado por las condiciones ambientales antes mencionadas, teniendo menor desarrollo en comparativa con el almácigo automatizado, el diámetro de copa de la planta alcanza valores de aproximadamente  $46,5 \text{ mm} \pm 4$  y una altura de  $49,5 \text{ mm} \pm 7$ , es importante mencionar que las hojas cotiledonares constituyen el primer tejido foto-sintético y por tanto, tienen una influencia decisiva en el crecimiento subsiguiente. (Ver **Figura 46**)

*Diámetro de copa de la planta.*



*Altura de la planta.*



**Figura 46.** Altura y diámetro de copa de la planta en el ambiente no automatizado.

- **Número de hojas:** Durante el tiempo en que se desarrolló la investigación, se evaluó el número de hojas por planta en cada almácigo. En las **Figuras 47a y 47b**, se puede apreciar que el número de hojas en el prototipo no automatizado sigue siendo de 2 hojas cotiledonares.



**(a)** Hojas cotiledonares del almácigo de café después de 1 mes de trasplantadas.



**(b)** Número de hojas en las plantas de café del prototipo no automatizado

**Figura 47.** Número de hojas en las plantas del prototipo no automatizado.

Por otro lado, en la **Figura 48a y 48b** se aprecia las plantas de café en el prototipo para almácigo de café automatizado en el que las plantas poseen cuatro hojas por colino, es decir su desarrollo es mayor que en las plantas del prototipo no automatizado.



(a) Número de hojas del almácigo de café automatizado después de 1 mes de trasplante.



(b) Cuatro hojas en las plantas de café del prototipo automatizado

**Figura 48.** Número de hojas de las plantas de café en el prototipo automatizado.

## 7. Discusión

El presente estudio sobre el diseño y construcción de un prototipo automatizado para almácigos de café responde a la necesidad de mejorar el desarrollo del colino, controlando variables críticas como temperatura y humedad, y reduciendo el uso de recursos y tiempo en el cuidado. En viveros de la ciudad de Loja, como “Las Cochas” y el de la Facultad Agropecuaria de la Universidad Nacional de Loja, se observaron deficiencias en el crecimiento, hojas amarillentas y deformaciones en las plantas. Según los encargados, estas anomalías están relacionadas principalmente con la temperatura, ya que la zona, situada por encima de los 2100 m.s.n.m., presenta temperaturas promedio de 16 a 18 °C y mínimas de hasta 10 °C.

En contraste, viveros ubicados en el cantón Olmedo (1200 m.s.n.m.) con temperaturas promedio entre 18 y 22 °C, evidencian una producción de colinos más saludable y con menor incidencia de enfermedades. Esto concuerda con lo expuesto por Arcila y Cenicafé (2007), quien advierte sobre los efectos negativos de altitudes superiores a 1850 m.s.n.m. debido a la temperatura, donde se incrementa la radiación ultravioleta y se generan plantas enanas, cloróticas o deformadas. De igual forma, Barva y Heredia (2011) indica que el rango altitudinal adecuado para el desarrollo del café está entre 500 y 1700 m.s.n.m., siendo desfavorable su cultivo por encima de este umbral. Temperaturas inferiores a 10 °C provocan clorosis y detención del crecimiento.

Diversos autores Arcila y Cenicafé, 2007; Venegas et al., 2018 coinciden en que la temperatura óptima para el desarrollo del café se sitúa entre 22 y 26 °C, con límites de tolerancia entre 10 y 32 °C; además, señalan que la humedad relativa ideal debe oscilar entre 65 % y 80 %, y la humedad del suelo entre 60 % y 70 %. A partir de estos parámetros, se tomó una muestra de un vivero de 10 mil chapolas y se diseñó un prototipo automatizado para 150 plantas, cuya evaluación se realizó comparativamente con un sistema tradicional bajo iguales condiciones de población, en la Universidad Nacional de Loja (2120 m.s.n.m.).

El prototipo se construyó sobre una base elevada de madera de 1.035  $m^2$  con drenaje para prevenir ataques fúngicos y facilitar el drenaje. La estructura fue de aluminio con cubierta plástica y polisombra del 80 %, permitiendo control térmico y sombreado. La automatización se implementó con una placa ESP32, sensores DHT22 (temperatura y humedad ambiental) y HD-38 (humedad de suelo), programados mediante Arduino IDE. La recolección de datos se efectuó mediante el protocolo MQTT hacia la plataforma IoT Ubidots, la cual permitió un monitoreo remoto básico mediante un panel de control con 10 widgets. Se aplicó control ON-OFF para regular los actuadores según los valores de los sensores.

Para el control térmico, se empleó una resistencia níquelina helicoidal de 800 W junto a un ventilador que recircula el aire caliente. Ante el aumento de temperatura por irradiación solar, se activaba un sistema de ventilación forzada que introducía aire exterior haciendo un barrido interno. Se logró mantener temperaturas nocturnas promedio de 22.8 °C y diurnas de 24.5 °C. No obstante, en días con alta radiación solar se registraron valores fuera del rango debido al efecto invernadero. En cuanto a la humedad relativa, los valores fueron de 75.6 % durante la noche y 74.3 % durante el día, mientras que la humedad del suelo promedió 66.09 %. Además el sistema para agregar humedad ambiente, aumentar el porcentaje de humedad de suelo y cuando la temperatura se elevaba por encima de los cuatro grados regulados en el setpoint el sistema de nebulización llegaba a encenderse.

Group (2016) señala que incluso con tasas de renovación de aire de 45 a 60 veces por hora, la temperatura interna puede ser entre 5.5 y 6.5 °C superior a la exterior bajo una radiación de 600  $W/m^2$ . Además, advierte que sistemas de refrigeración mecánica implican altos costos operativos. Por ello, recomienda sistemas de ventilación húmeda, aspersión o nebulización como alternativas viables. Martínez y Roca (2011) resalta la importancia de establecer el control climático conforme a los requerimientos fisiológicos del cultivo, considerando tanto temperaturas óptimas como límites biológicos y letales. También se destaca que las renovaciones de aire favorecen el control de humedad, concentración de  $CO_2$  e intercambio gaseoso.

El sistema de calefacción debe ser constante, uniforme, fiable, automatizable y económicamente viable, sin requerir personal especializado. Además los sensores empleados deben ser económicos, de bajo mantenimiento y calibración mínima Baas y Sloopweg, 2003. Es así que estas definiciones concuerdan con lo expuesto en la investigación, ya que todo el sistema lleva funcionando más de 10 meses con muy poco mantenimiento, además es importante mencionar que el sistema fue respaldado por un UPS, cuya finalidad fue proteger el sistema ante eventualidades energéticas.

La comparación entre ambos sistemas, realizada tras un mes del trasplante, evidenció que el prototipo automatizado permitió un desarrollo superior: promedio de altura de 77.2 mm, diámetro de copa de 59.43 mm y 0 % de incidencia fitosanitaria. En contraste, el sistema tradicional mostró una altura promedio de 49.57 mm, diámetro de copa de 46.57 mm y un 23.3 % de incidencia de enfermedades o muerte descendente. Estos resultados coinciden con los reportados por Arcila y Cenicafé (2007), que relaciona un mejor crecimiento y número de hojas con temperaturas entre 22 y 26°C.

Según Martínez y Roca (2011) y Mentsiev et al. (2019), la automatización del control de variables como temperatura, humedad y riego no solo mejora el rendimiento y la calidad, sino que permite un uso más eficiente de los recursos. Esta investigación

demuestra que el uso de sensores, actuadores y plataformas IoT permite un monitoreo y control efectivo, resultando en un mejor desarrollo de los almácigos. Sin embargo, es necesario considerar que la eficiencia del automatismo depende de las condiciones climáticas locales, biológicas del cultivo y del diseño del invernadero. Además, como señala Martínez y Roca (2011), una mayor inversión en tecnología no garantiza mayor rentabilidad, ya que también incrementa los costos de producción. Por tanto, debe evaluarse cuidadosamente el equilibrio entre inversión, demanda del mercado y capacidad de control climático. En este caso, no se priorizó la evaluación del consumo energético.

## 8. Conclusiones

- La investigación sobre almácigos de café de especialidad cultivados en el cantón Loja, complementada con revisión bibliográfica, permitió identificar las condiciones adecuadas para el desarrollo de la variedad Sarchimor. Estas comprenden temperaturas entre 22 °C y 26 °C, humedad relativa del 65 % al 80 % y humedad de suelo del 60 % y 70 %. Se evidenció que la temperatura interior del invernadero está influenciada por las condiciones climáticas externa: durante el día por la radiación solar, y durante la noche por los intercambios térmicos por conducción, convección, fugas y la transmisividad del material de cubierta. El cumplimiento de estos parámetros favorece el desarrollo de las plantas y previene la aparición de enfermedades fitosanitarias. El establecer almácigos por encima de los 1850 m.s.n.m. afecta directamente al crecimiento del café, debido a las bajas temperaturas y mayor radiación solar, por lo que propician la aparición de plántulas enanas, cloróticas y con alta incidencia de enfermedades, fenómenos observados especialmente en el prototipo desarrollado bajo condiciones tradicionales.
- El diseño y construcción del prototipo de almácigo de café inició con la determinación de una muestra confiable, en base a ello se trabajó con una muestra de 150 plantas distribuidas en un área de 1.035 m<sup>2</sup>. La estructura se montó sobre una base de madera elevada para facilitar el manejo, incorporando geomembrana para asegurar un drenaje adecuado y prevenir exceso de humedad. El invernadero se construyó con estructura de aluminio y cubierta de polietileno de una capa. La automatización inició con la selección de variables críticas y sensores según el área a monitorear: un DHT22 para temperatura y humedad ambiente, y dos HD-38 para humedad del suelo. Para el sistema de calefacción, se instaló una níquelina helicoidal de 800 W, dimensionada según cálculos de convección-radiación, con un 10 % adicional para compensar pérdidas. El sistema de nebulización incluyó cuatro boquillas cuya operación va desde 2 a 12 bar, alimentadas por una bomba con presión de salida de 5.86 bar. Para la ventilación, se dimensionó en base a renovaciones por hora según las temperaturas alcanzadas en el invernadero, por lo que se utilizó un ventilador de 203.88 m<sup>3</sup>/h y dos extractores de 150 m<sup>3</sup>/h, con respaldo de simulaciones en Ansys. Se utilizó una tarjeta ESP32 por su conectividad WiFi, implementando el protocolo MQTT para el envío de datos a la plataforma IoT Ubidots. El sistema automatizado logró mantener condiciones ambientales adecuadas: temperaturas de 22.8 °C nocturnas y 24.5 °C diurnas, humedad relativa de 75.6 % en la noche y 74.3 % durante el día, y humedad del suelo de 66.09 %, lo que mejoró el rendimiento en la producción y calidad de las plantas.
- La comparación de resultados luego de un mes de cultivo acerca del desarrollo de la planta de café en el prototipo automatizado y el método tradicional, permitió

concluir que la automatización de la temperatura y humedad influyó notoriamente en el desarrollo de las plantas, sin signos de clorosis, deformaciones ni problemas fitosanitarios. En contraste, en el método tradicional al menos el 23.3 % presentó problemas fitosanitarios, retraso en el desarrollo, además de requerir un mayor tiempo en el cuidado. Además se evidenció que las plantas en el almácigo automatizado alcanzaron en promedio una altura de 77.22 mm y un diámetro de copa de 59.43 mm, mientras que en el sistema tradicional estos valores fueron de 49.57 mm y 46.57 mm, respectivamente. Esta diferencia demuestra que la automatización mejora la calidad de las plántulas, reduce el esfuerzo operativo y acelera el proceso de formación de colinos aptos para el trasplante.

## 9. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis completo sobre el control de temperatura que posiblemente incluya sistemas de refrigeración cuando el sistema tenga mayor cantidad de aporte de energía en días soleados, debido a que la investigación el control de exceso de temperatura se limitó a la ventilación forzada, es decir tratar de disminuir la temperatura haciendo un barrido interno con aire del exterior, por lo que este sistema estuvo por fuera del rango cuando el aporte de energía solar por radiación era excesivo.
- Se recomienda realizar la construcción con materiales más resistentes al medio ambiente, ya que al considerar la estructura de madera se notó un prematuro desgaste, así mismo al utilizar plástico de polietileno de una capa se tendrá que reemplazar, por lo que para realizar equipos con mayores prestaciones en cuanto a la cantidad de manejo plantas se debe optar por materiales más resistentes que puedan servir de aporte para un prolongado periodo de tiempo.
- Se debe entender que mayor inversión en equipamiento y tecnología no implica mayor rentabilidad, ya que al aumentar los niveles de tecnología aumentan los costes de producción, en base a ello se debe evaluar la rentabilidad del cultivo a medio y largo plazo en base al mercado de destino, exigencias del mercado, inversiones, necesidades del cultivo, técnicas y la capacidad de evaluar las condiciones del clima del invernadero.
- Para evitar interferencias y asegurar la fiabilidad en la transmisión de los datos, se recomienda utilizar conductores apantallados y/o con alto grado de protección. Minimizando el impacto de ruidos eléctricos, interferencias electromagnéticas y radiaciones externas que puedan afectar la exactitud de las lecturas de los sensores y puedan comprometer el funcionamiento del sistema. En caso de replicar el sistema en áreas más extensas, se debe considerar el uso de sensores industriales en lugar de módulos básicos pero sin comprometer la rentabilidad.
- Debido a la importancia creciente del ahorro de energía, así como el interés del uso de fuentes de energía se recomienda estudiar medidas para minimizar el consumo de energía y la eficiencia en su uso, sobre todo para el sistema de calefacción que es el que genera mayor consumo eléctrico, en base a ello se puede implementar sistemas de apertura y cierre en las rejillas de ventilación para reducir las pérdidas de calor durante la noche.
- Debido a las limitaciones para el envío de datos a través de la internet, se debe evaluar la conectividad WiFi, lo cual puede ser problemático en áreas rurales con conexiones a internet inestables, por lo que se recomienda explorar otros tipos de sistemas para el envío de datos como LoRa, Tecnología celular o sistemas que permitan

interactuar directamente con el usuario como pantallas de bajo coste. Así mismo la plataforma empleada en la investigación presentó ciertas limitaciones, ya que al ser una cuenta gratuita solo deja manejar una cierta cantidad de datos y widgets, por lo que si se requiere almacenar una mayor cantidad de datos y mejorar el sistema remoto se puede explorar otras plataformas o bien adquirir la versión pagada.

## 10. Bibliografía

- Almandoz Berrondo, J., Jimenez Redal, R., Mongelos Oquiñena, B., & Pellejero Salaberria, I. (s.f.). Cuadros y ábacos (Ingeniería fluidomecánica). <https://es.scribd.com/document/409035614/Cuadros-y-Abacos>
- Alonso, R. (2024, enero). Fuente de alimentación: cómo funciona, tipos y características. <https://hardzone.es/reportajes/que-es/fuente-alimentacion-caracteristicas/>
- Arcila, J., & Cenicafé. (2007). Establecimiento y administración del Cafetal. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/720/5/4.%20Establecimiento%20y%20administraci%c3%b3n%20cafetal.pdf>
- Association, S. C. (2023, agosto). Todo sobre la SCA (Speciality Coffee Association) • Ineffable Coffee. <https://ineffablecoffee.com/sca-speciality-coffee-association/>
- Axel. (2022, mayo). Condiciones meteorológicas óptimas para el cultivo de café - Mare Terra Coffee. <https://mareterracoffee.com/es/blog/condiciones-meteorologicas-optimas-para-el-cultivo-de-cafe/>
- Baas, R., & Slootweg, G. (2003). On-line acquisition of plant related and environmental parameters (Plant Monitoring) in Gerbera: Determining plant responses. *Acta Horticulturae 654 (2004), 654*. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.654.14>
- Barva & Heredia. (2011). Guía técnica para el cultivo de café. <https://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA-V10.pdf>
- Briceño-Martínez, B., Castillo-Calderón, J., Carrión-Jaura, R., & Díaz-Sinche, D. (2020). Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada. *Ingenius*, 36-48. <https://doi.org/10.17163/ingenius.n24.2020.04>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones* (4a edición). McGrawHill.
- Cherlinka, V. (2022, noviembre). Agricultura Inteligente: Cómo Implementarla Y Sus Beneficios. <https://eos.com/es/blog/agricultura-inteligente/>
- Cumbicus, E., Jiménez, R., & Landacay, M. (2012). Análisis Sectorial del Café en la Zona 7 del Ecuador. <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2703/1/338X1227.pdf>
- Delgado, A. D. Y. J. (s.f.). Ecological HVAC Solutions - VentDepot.com. <https://www.ventdepot.com/>
- ELECTRONICS, U. (s.f.). Sensor de Temperatura y Humedad DHT22 con cables -. <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht22-con-cables/>
- Electrostore. (s.f.). MÓDULO SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO HD-38 HIGRÓMETRO ANTICORROSIVO. <https://grupoelectrostore.com/shop/sensores/temperatura/modulo-sensor-de-humedad-de-suelo-hd-38-higrometro-anticorrosivo/>

- Espressif-Systems. (2024). ESP32 Series Datasheet 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth <sup>®</sup> + Bluetooth LE SoC Including. [www.espressif.com](http://www.espressif.com)
- Fernando, F., Serna, C., Sánchez, P., & de Investigaciones de Café - Cenicafé, C. N. (2015, febrero). Vista de Almácigos para caficultura orgánica: Alternativas y costos | Avances Técnicos Cenicafé. <https://doi.org/https://doi.org/10.38141/10779/0452>
- Gaitán, Á., Villegas, C., Rivillas, C., Hincapié, É., & Arcila, J. (2011). ALMÁCIGOS DE CAFÉ: Calidad fitosanitaria, manejo y siembra en el campo. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/350/1/avt0404.pdf>
- Gámez, B. (2023, marzo). Lámparas LED para cultivo: la solución para que las plantas de interior crezcan fuertes y sanas | Escaparate: compras y ofertas | EL PAÍS. <https://elpais.com/escaparate/2023-03-07/lamparas-led-para-cultivo-la-solucion-para-que-las-plantas-de-interior-crezcan-fuertes-y-sanas.html>
- George. (2022, septiembre). Cómo sembrar café - Tipos de plantas de café y recomendaciones de cómo plantarlas para que germinen. <https://www.mundodeportivo.com/uncomo/hogar/articulo/como-sembrar-cafe-49857.html>
- Gosset, W. (2016, junio). Distribución «T» de Student. <https://estadisticaeninvestigacion.wordpress.com/distribucion-t-de-student/>
- Group, S. P. V. (2016, enero). Hojas técnicas La climatización de invernaderos – SP. <https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/otrc/CATALOGO%20SERIE%20AGRO%202019.pdf>
- Hernández, R. (2024, marzo). Guía: ¿Qué es un invernadero? Tipos y Usos. [https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=44](https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=44)
- HIKMICRO. (s.f.). Cámara térmica portátil HIKMICRO de la serie B. <https://www.hikmicrotech.com/es/industrial-products/b-series-handheld-thermal-imager/>
- Jacto. (2020, octubre). Tipos de riego: ¿cuál es el indicado? <https://bloglatam.jacto.com/tipos-de-riego/>
- Kit de atomización, sistema de atomización de rociador de cobre ajustable de 360 grados. (s.f.). [https://www.amazon.com/-/es/gp/product/B0BVFMT1CQ/ref=ewc\\_pr\\_img\\_5?smid=A1703WO8A2UEUO&psc=1](https://www.amazon.com/-/es/gp/product/B0BVFMT1CQ/ref=ewc_pr_img_5?smid=A1703WO8A2UEUO&psc=1)
- López, J., Rodríguez, M., Barrera, C., Makepeace, D., & Guzmán, J. (2016, agosto). Manual Técnico para la Producción de Café Robusta. <https://www.anacafe.org/uploads/file/283f6fd107ef4ce38af855880c47c49d/Manual-Cafe-Robusta.pdf>
- Maderea. (2021, junio). Madera de pino y abeto para uso estructural. <https://www.maderea.es/madera-de-pino-y-abeto-para-uso-estructural/>
- MAGAP. (2017). Mapa Cultivos. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/index.php/mapas-interactivos/2-uncategorised/37-mapa-cultivos>
- Martínez, P., & Roca, D. (2011, diciembre). El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado.

- Massa, G. D., Kim, H.-H., Wheeler, R. M., & Mitchell, C. A. (2008). Plant Productivity in Response to LED Lighting. *HortScience*, 43(7), 1951-1956. <https://doi.org/10.21273/hortsci.43.7.1951>
- Mentsiev, A. U., Isaev, A. R., Supaeva, K. S., Yunaeva, S. M., & Khatuev, U. A. (2019). Advancement of mechanical automation in the agriculture sector and overview of IoT. *Journal of physics. Conference series*, 1399(4), 044042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044042>
- Mosquera, L. M., Cevallos, C. D., & Barcia, O. (2022). Diseño e implementación de un prototipo IoT para el monitoreo de parámetros ambientales aplicados a cultivo arroz utilizando ESP32 y Thinkspeak. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22884/4/UPS-GT003870.pdf>
- Myway, C. (2024, junio). La Variedad de Café Sarchimor: Resistencia y Calidad en Perfecta Armonía. <https://cafesmyway.com/variedad/sarchimor/>
- NOYafa. (s.f.). NOYafa NF-521 Cheap thermal imaging camera for house inspection. <https://www.noyafa.com/collections/temperature-measurement/products/nf-521-cheap-thermal-image-camera>
- PLEXYLAB. (s.f.). Módulo sensor de humedad del suelo HD-38 Higrómetro con sonda resistente. <https://www.plexylab.com/product-page/m%C3%B3dulo-sensor-de-humedad-del-suelo-hd-38-higr%C3%B3metro-con-sonda-resistente>
- SIAU. (2024). Ventilador axial impermeable. <https://acortar.link/UpUEnd>
- Solocafé. (2021, abril). Construcción de viveros e invernaderos | Solo café de Calidad. <http://www.solocafe.com.mx/equipos/construccion-de-viveros-e-invernaderos/>
- TurismoEC. (2022, octubre). Catálogo de Cafeterías de Café lojano. [https://issuu.com/ecuadortravelinvestigacion/docs/folleto\\_cafe\\_loja\\_2022](https://issuu.com/ecuadortravelinvestigacion/docs/folleto_cafe_loja_2022)
- Valenzuela, J. R., Peña, B. E., & Muñiz, T. G. (2023, mayo). Vista de Agricultura 4.0. <https://doi.org/10.59741/agraria.v19iSE1.4>
- Valvano, J., & Yerraballi, R. (2014). Chapter 14: Analog to Digital Conversion, Data Acquisition and Control. [https://users.ece.utexas.edu/~valvano/Volume1/E-Book/C14\\_ADCdataAcquisition.htm](https://users.ece.utexas.edu/~valvano/Volume1/E-Book/C14_ADCdataAcquisition.htm)
- Vázquez, J. (2023, mayo). Loja, café de calidad con denominación de origen | Cultura Científica - UTPL. <https://culturacientifica.utpl.edu.ec/loja-cafe-de-calidad-con-denominacion-de-origen/>
- Venegas, S., Orellana, D., & Pérez, P. (2018, marzo). La realidad Ecuatoriana en la producción de café. [https://doi.org/10.26820/recimundo/2.\(2\).2018.24-44](https://doi.org/10.26820/recimundo/2.(2).2018.24-44)
- Vignola, R., Watler, W., Coto, K. P., Céspedes, A. V., Coordinadora, M. M. A. P. R. V., & Morales, M. (2018, enero). FICHA TÉCNICA CULTIVO DE CAFÉ Realizado con el aporte del Fondo de Adaptación Realizado con el aporte del Fondo de Adaptación Con contribuciones de. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>

## 11. Anexos

### Anexo 1. Oficio de aprobación del proyecto de tesis y designación del tutor de tesis.



Carrera de  
Electromecánica

Memorando Nro.: UNL-FEIRNNR-CEM-2024-0319-M

Loja, 07 de mayo de 2024

**PARA:** Sr. Cristian Vinicio Ortega Reyes  
**Personal Academico Ocasional 1 Tiempo Completo**

**ASUNTO:** Aprobación tema y Notificación de Director Trabajo de Integración Curricular Sr. Carlos David Armijos C.

De mi consideración:

Cúmpleme comunicar a usted, que de conformidad a lo preceptuado en el **art. 228 REGLAMENTO DE REGIMEN ACADÉMICO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**, y en virtud del informe favorable sobre la **estructura, pertinencia y coherencia del proyecto** emitido por el docente designado para el efecto; esta Dirección, **aprueba** el proyecto de tesis denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO AUTOMATIZADO DE ALMÁCIGO DE CAFÉ DE ESPECIALIDAD PARA EL LABORATORIO DEL CITE”**; presentado por el estudiante señor **Carlos David Armijos Carrión**; previo a optar el título de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**, en la **Carrera de Electromecánica**, designando a la vez en calidad de Director al **Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes; MSc.**

Particular que comunico a usted, para los fines legales subsiguientes.

Atentamente,



*Documento firmado electrónicamente*

Sr. Darwin Giovanni Tapia Peralta  
**DIRECTOR DE CARRERA**

Anexos:

- solicitud\_designación\_de\_director\_armijos\_carlos\_david.pdf

Copia:

Carlos David Armijos Carrion

Sr. Marco Vinicio Rojas Moncayo  
**Docente Titular Agregado 1**

Sra. Vanessa Elizabeth Guerrero Jaramillo  
**Asistente de Apoyo a la Gestión Académica**

Anexo 2. Planos de prototipo para almácigo de café automatizado y de forma tradicional. Esquema de conexión de circuito de control y fuerza para automatización del prototipo.



Para visualizar los planos en Drive haga clic aquí

### Anexo 3. Tablas de propiedades del aire a presión de 1 atm.

**TABLA A-15**

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ , a la temperatura dada, por  $P$  y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$ .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

**Figura 49.** Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Fuente: Obtenido de: Çengel y Ghajar, 2011

## Anexo 4. Cuadros y Ábacos (Ingeniería fluidomecánica)

### VALORES DE LA RUGOSIDAD

Tipo de tubería	Valores de $\epsilon$ en centímetros (cm)	
	Intervalo	Valor de diseño
Acero roblonado	0,091 – 0,91	0,18
Hormigón	0,03 – 0,3	0,12
Fundición	0,012 – 0,06	0,026
Madera	0,0183 – 0,09	0,06
Hierro galvanizado	0,006 – 0,024	0,015
Fundición asfaltada	0,006 – 0,018	0,012
Acero comercial y soldado	0,003 – 0,009	0,006
Hierro forjado	0,003 -0,009	0,006
Tubo estirado	0,00024	0,00024
Latón y cobre	0,00015	0,00015
Fibro cemento	0,01	0,01
PVC y PE	0,0007	0,0007

**Figura 50.** Valores de rugosidad para distintos materiales

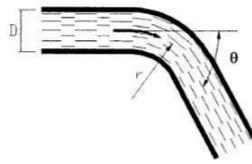
Fuente: Recuperado de: Almandoz Berrondo et al., s.f.

MUY LISAS	$C_{HW} = 150$	$\epsilon/D \leq 1,5 \cdot 10^{-5}$
LISAS	$C_{HW} = 140$	$1,5 \cdot 10^{-5} < \epsilon/D \leq 2 \cdot 10^{-4}$
SEMILISAS	$C_{HW} = 130$	$2 \cdot 10^{-4} < \epsilon/D \leq 1 \cdot 10^{-3}$
RUGOSAS	$C_{HW} = 120$	$1 \cdot 10^{-3} < \epsilon/D \leq 4 \cdot 10^{-3}$
MUY RUGOSAS	$C_{HW} = 110$	$4 \cdot 10^{-3} < \epsilon/D \leq 1,5 \cdot 10^{-2}$
EXCESIVAMENTE RUGOSAS	$C_{HW} = 100$	$\epsilon/D > 1,5 \cdot 10^{-2}$

**Figura 51.** Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

Fuente: Recuperado de: Almandoz Berrondo et al., s.f.

CODOS REDONDEADOS

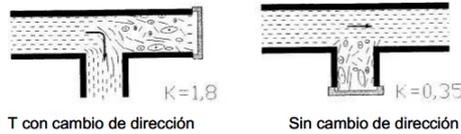


r/D \ theta	1	2	3	4	6
22,5°	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
30°	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
45°	0,14	0,10	0,09	0,08	0,08
60°	0,19	0,12	0,11	0,10	0,09
90°	0,21	0,14	0,12	0,11	0,09

Figura 52. Pérdidas en codo redondeado

Fuente: Recuperado de: Almandoz Berrondo et al., s.f.

EMPALME EN T NORMAL



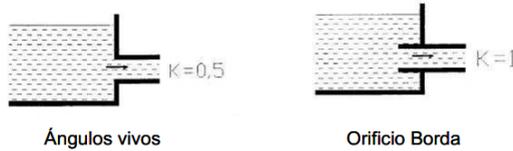
T con cambio de dirección

Sin cambio de dirección

Figura 53. Pérdidas en empalmes en T

Fuente: Recuperado de: Almandoz Berrondo et al., s.f.

SALIDAS DE DEPÓSITOS



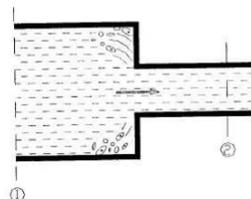
Ángulos vivos

Orificio Borda

Figura 54. Pérdidas en salida de depósito, orificio borda

Fuente: Recuperado de: Almandoz Berrondo et al., s.f.

ESTRECHAMIENTO BRUSCO



$$K = \left[ \frac{1}{C_c} - 1 \right]^2$$

$$h_f = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
C <sub>c</sub>	0,624	0,632	0,643	0,659	0,681	0,712	0,755	0,813	0,892	1

Figura 55. Pérdidas en estrechamiento brusco

Fuente: Recuperado de: Almandoz Berrondo et al., s.f.

## Anexo 5. Equipos de medición.

Anemómetro Kestrel 4500NV Electronic Hand Held Weather Meter para medición de velocidad del viento dentro del almácigo.



**Figura 56.** Anemómetro Kestrel 4500NV Electronic Hand Held Weather Meter

GPS portátil Garmin eTrex Venture HC para medición de altura con respecto a nivel del mar.



**Figura 57.** GPS portátil Garmin eTrex Venture HC

## Anexo 6. Cámara termográfica NOYAFa NF-521 y Hikmicro B01



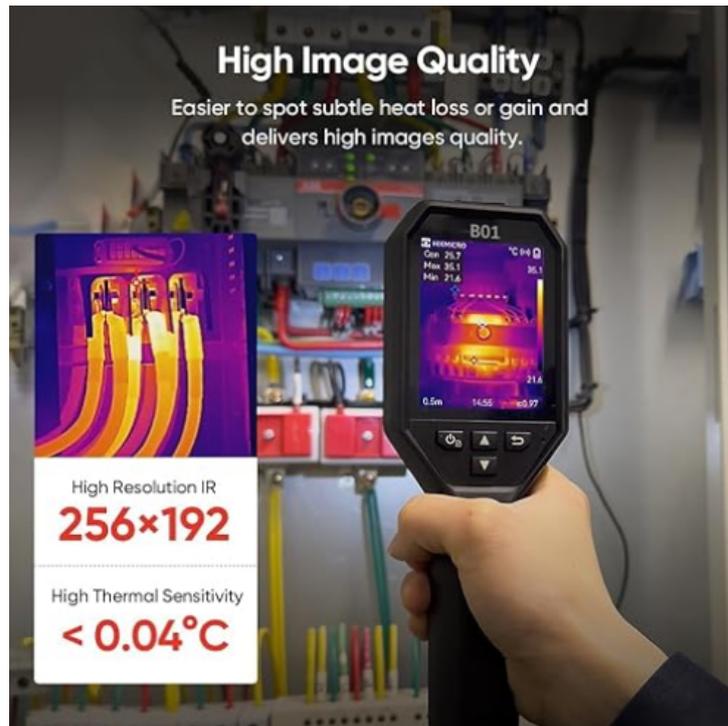
**Figura 58.** Cámara termográfica NOYAFa NF-521.

Fuente: Obtenido de: NOYAFa, s.f.

### Especificaciones del producto

- Resolución: 32\*32 (1024 píxeles)
- Campo de visión: 33° horizontal
- Frecuencia de cuadros: 9 Hz
- Rango de temperatura: -20 °C a 400 °C / -4 °F a 752 °F
- Cámara de luz visible: 2 megapíxeles
- Modos de fusión: modo infrarrojo, modo de detección de bordes infrarrojos, modo de fusión de luz dual y modo de luz visible.
- Paletas de colores: Rojo hierro, color frío, calor negro, arcoíris, calor rojo, calor blanco y lava.
- Ancho de banda espectral infrarrojo: 8-14 m
- Campo de visión (IFV): 18 mrad
- Sensibilidad de imagen térmica: 150 mk
- Formato de imagen: BMP

- Pantalla: LCD
- Resolución de pantalla: 320\*240
- Batería: 3,7 V 2600 mAh
- Almacenamiento: Tarjeta TF de 16 GB
- Resistente a caídas: 1 metro/3,28 pies
- Tamaño: 60\*120\*210 mm. (NOYAFa, s.f.)



**Figura 59.** Cámara termográfica Hikmicro B01.

Fuente: Obtenido de: HIKMICRO, s.f.

Modelo		B1L	B11	B20
Imagen IR	Resolución IR	160 × 120 (19,200 pixels)	192 × 144 (27,648 pixels)	256 × 192 (49,152 pixels)
	NETD	< 40 mK (@ 25 °C, F#=1.0)		
	Frecuencia de Imagen	25 Hz		
	Campo de visión (FOV)	32.9° × 44.4°	27.8° × 37.2°	37.2° × 50.0°
	Distancia mínima de enfoque	0.3 m (0.98 ft)		
	Modo de enfoque	Fijo		
Display de imagen	Camera visual	N/A	1600 × 1200 (2 MP)	
Medición y análisis	Object Temperature Range	-20°C to 550°C (-4°F to 1022°F)		
	Presición	Max (±2°C/3.6°F, ±2%), para la temperatura ambiente de 15 °C a 35 °C (59 °F a 95 °F) y la temperatura del objeto por encima de 0 °C (32 °F)		
General	Wi-Fi	802.11 b/g/n (2.4GHz)		
	Duración de batería	Approx. 8 horas	Approx. 6 horas	Approx. 6 horas

**Figura 60.** Datasheet Hikmicro B01.

Fuente: Obtenido de: HIKMICRO, s.f.

**Anexo 7. Tablas e imágenes de especificaciones y características de componentes del sistema de control.**

**Tabla 19.** Especificaciones y características de ventilador axial

<b>ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS</b>	
Dimensiones	1.5"l. x 4.72."an. x 4.72."al
Voltaje de alimentación:	115 VAC
Corriente:	0.3 A
Caudal:	120 CFM
Nivel de ruido:	47 dB
Grado de protección IP:	IP 55
Velocidad máxima de rotación:	2200 rpm
Potencia:	15 W

**Tabla 20.** Especificaciones y características del sensor DHT22

<b>ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS</b>	
Modelo	DHT22 AM2302 con PCB
Voltaje de funcionamiento	3.3 V a 5.5 V
Rango de medición Temperatura	-40°C a 125°C
Precisión de medición de temperatura	±0.5 °C
Resolución de Temperatura:	0.1°C
Rango de medición Humedad	0 % hasta 100 % RH 0.5°C de variación
Precisión de medición de humedad	2 % RH
Resolución Humedad	0.1 % RH
Consumo de corriente	2.5 mA
Señal de salida	Digital
Distancia máxima de cable de datos	20 m

Fuente: ELECTRONICS, s.f.

**Tabla 21.** Especificaciones y características de higrómetro HD-38

<b>ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS</b>	
Temperatura de funcionamiento:	-25 °C a 85 °C
Tipos de salida:	Digital y analógica
Voltaje de alimentación:	3.3–12 VDC
Corriente de funcionamiento:	20 mA
Corriente de salida:	30 mA

Fuente: Electrostore, s.f.

**Tabla 22.** Especificaciones y características de bomba de diafragma de alta presión

<b>ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS</b>	
- Dimensiones del producto	6,3in l. x 3,94in an. x 1,97in al
- Presión:	85 psi
- Fuente de alimentación:	12VDC
-Corriente:	3.2A
- Flujo:	5L/minuto
- Potencia:	36W

Fuente: Aimela Store, 2024 .



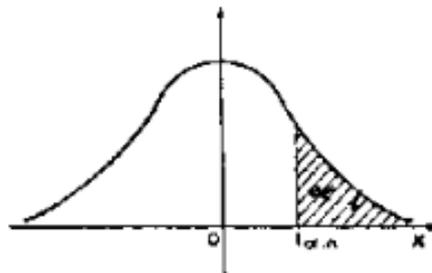
**Figura 61.** Dimensiones del kit de riego por atomización

Fuente: («Kit de atomización, sistema de atomización de rociador de cobre ajustable de 360 grados», s.f.)

**Tabla 23.** Especificaciones y características de luz de espectro para plantas.

<b>ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS</b>	
Iluminación de espectro completo	380 nm a 780 nm (incluido UV + IR)
Temperatura de funcionamiento	50 ° F a 60 ° F
Voltaje de alimentación:	110 VAC
Potencia	1000 W
tiempo para etapa de germinación	18 horas on / 6 horas off

Anexo 8. Tabla de T de Student en un extremo.



$\alpha/2$ df	0,40	0,30	0,20	0,10	0,050	0,025	0,010	0,005	0,001	0,0005
1	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6
2	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859
6	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,405
8	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	0,258	0,535	0,863	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,013
17	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,922
19	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767
24	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,192	2,797	3,467	3,745
25	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	0,255	0,529	0,851	1,303	1,648	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	0,255	0,528	0,849	1,298	1,676	2,009	2,403	2,678	3,262	3,495
60	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415
100	0,254	0,526	0,845	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389
200	0,254	0,525	0,843	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339
500	0,253	0,525	0,842	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,106	3,310
$\infty$	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291

Figura 62. Distribución T de Student.

Fuente: Obtenido de: Gosset, 2016

Anexo 9. Programación en Arduino IDE para el control del almácigo de café.



Para visualizar el código empleado en la automatización del prototipo de clic aquí

## Anexo 10. Certificación de traducción del resumen

Loja, 12 de febrero de 2025

María Fernanda Ayala Espinoza

**Licenciada en Pedagogía del Idioma Inglés**

A petición de la parte interesada y en forma legal.

### ***CERTIFICA:***

Que el Señor **Carlos David Armijos Carrión**, con cédula de identidad número **1105408502**, estudiante de la Carrera de Electromecánica, de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, completó satisfactoriamente la presente traducción de español a inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño y construcción de prototipo automatizado de almácigo de café de especialidad para el laboratorio del CITE.**

Traducción que fue guiada y revisada minuciosamente por mi persona. En consecuencia, se da validez a la presentación de la misma. Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso del presente documento en lo que estimare conveniente.



---

Lcda. María Fernanda Ayala  
**Registro Senescyt: 1008-2023-2602492**