



Universidad Austral de Chile
Conocimiento y Naturaleza

Heatbox. Una herramienta costo-eficiente para simular estrés térmico en plántulas

Patrocinante: Sr. Carlos Gonzalez-Benecke.

Trabajo de Tesina presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales

AGUSTÍN MATÍAS CIFUENTES OPORTUS

VALDIVIA

2025

	Índice de materias	Página
i	Calificación del comité de titulación	i
ii	Resumen	ii
1	INTRODUCCIÓN	1
2	MATERIALES Y MÉTODOS	3
2.1	Selección de componentes de la cámara	3
2.2	Selección de componentes del controlador al interior del Heatbox	4
2.3	Selección de componentes del controlador al exterior del Heatbox	5
2.4	Diseño del circuito electrónico	6
2.5	Programación y creación sistema de control	8
2.6	Validación del código y el prototipo	8
3	RESULTADOS	9
4	DISCUSIÓN	11
5	CONCLUSIÓN	13
6	REFERENCIAS	14
Anexos	1 Detalle de costos	
	2 Código Python para el Control del Heatbox	
	3 Protocolo de uso Heatbox v1.0	

Calificación del comité de titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Carlos Gonzalez-Benecke	<u>6,0</u>
Informante: Sr. Fernando Droppelmann Felmer	<u>6,3</u>
Informante: Sr. Oscar Thiers Espinoza	<u>6,2</u>

El Patrocinante acredita que la presente Tesina cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



Sr. Carlos Gonzalez-Benecke

Resumen

El cambio climático ha intensificado eventos extremos como las olas de calor, afectando la estabilidad de los ecosistemas en todo el mundo. En Chile, el bosque nativo representa una parte significativa del territorio, pero la limitada información sobre su respuesta a estos fenómenos dificulta el desarrollo de estrategias de conservación y manejo. Este desafío se ve agravado por la falta de herramientas experimentales accesibles, cuyos altos costos restringen su uso en centros de investigación más pequeños y en estudios realizados por estudiantes. Por esta razón se planteó como objetivo la creación del Heatbox, un prototipo de cámara térmica diseñado para simular condiciones de alto estrés térmico en plántulas bajo un ambiente controlado. Esta cámara térmica tiene potencial para diversas aplicaciones en fisiología vegetal, ecología y ciencias bioquímicas. Con el desarrollo del Heatbox se buscó fomentar el uso de tecnologías accesibles y escalables, utilizando componentes no especializados, reduciendo costos y empleando software de código abierto. Se validó el correcto funcionamiento del Heatbox en términos de construcción y recolección de datos. Los resultados confirmaron una correlación inversa entre temperatura y humedad relativa (HR), consistente con la literatura contemporánea. Sin embargo, se identificaron limitaciones en el alcance de temperatura, ya que solo logró estabilizarse en 40°C, sin alcanzar valores superiores. Asimismo, el sistema de humidificación (BLOWER) no logró regular de manera autónoma la HR, requiriendo intervenciones manuales debido a la falta de generación de aerosol en el interior de la cámara. A pesar de sus limitaciones, el Heatbox se posiciona como una alternativa accesible y modular frente a cámaras climáticas comerciales, las cuales pueden superar los \$10,000 USD, mientras que este prototipo se implementó con un presupuesto de \$860 USD. Finalmente, se identificaron oportunidades de mejora que permitirán una mayor estabilidad en la regulación de variables ambientales, favoreciendo la replicabilidad del sistema en futuras investigaciones y su adaptación a nuevas aplicaciones científicas.

Palabras claves: cambio climático, automatización, cámara climática, prototipo científico, bajo costo.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los eventos climáticos extremos han sido evaluados cuantitativamente a nivel global, despertando un creciente interés en la literatura científica contemporánea. Chile no ha estado exento de esta tendencia, con diversas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales dedicadas a investigar estos fenómenos mediante enfoques multifactoriales y transdisciplinarios. Entre ellas destacan el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), y el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) a través del Sistema de Información Ambiental (SINIA). Estas instituciones abordan diferentes enfoques: el IPCC en estudios de macroescala, el CR2 en proyección y modelación local, y el MMA en la sistematización de la información para la toma de decisiones (MMA s.f., IPCC 2013, CR2 2023).

Estas organizaciones comparten el interés por estudiar la sustentabilidad y productividad de los bosques así como el cambio en el hábitat e intentan responder a la problemática de posibles situaciones nocivas que pueden generarse por la transformación de las variables ambientales que moldean el ecosistema, en ese sentido la atención mediática acompaña los eventos extremos a lo largo del país, desde las mega-sequías hasta ciclones extratropicales, pero mayoritariamente el foco ha sido dirigido al evento y no sus implicancias tanto para el sector productivo como para la conservación y es que adicional al impacto sobre la población de manera directa, el efecto indirecto por causa del deterioro del ecosistema es también significativo (IPCC 2023). En Chile los bosques representan casi un cuarto de la superficie nacional, siendo el bosque nativo el mayor, luego las plantaciones forestales seguida del bosque mixto con 19.5%, 4.1% y 0.2%, respectivamente y es que los eventos anómalos han afectado la calidad y cantidad de estos (CONAF 2021).

Estos eventos extremos y el cambio climático representa uno de los mayores desafíos para la sostenibilidad de los sistemas naturales, agrícolas y forestales, estos fenómenos afectan directamente la fisiología, productividad y supervivencia de las especies vegetales exponiéndolas a condiciones que sobrepasan sus umbrales de tolerancia dañando procesos claves como la fotosíntesis, transpiración o producción de biomasa (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto 2017, Méndez-Espinoza y Vallejo Reyna 2019).

Para comprender cómo las especies vegetales responden a situaciones de alto estrés térmico, es esencial desarrollar modelos experimentales que permitan simular escenarios extremos y evaluar sus efectos en distintos niveles, desde la fisiología hasta el crecimiento y la supervivencia. El estrés térmico

impacta desde la estructura celular, afectando el fotosistema II, la fase fotoquímica y el transporte de electrones, hasta procesos clave en la planta como el incremento de la respiración, la reducción de la fotosíntesis, la conductancia estomática, el crecimiento y la reproducción (Marias et al. 2017).

La elaboración de herramientas experimentales es fundamental para identificar mecanismos de aclimatación y adaptación en diversas especies forestales, sin importar su propósito comercial o de conservación. La investigación en este campo resulta clave para diseñar prácticas sostenibles que contribuyan a mitigar los efectos adversos del calentamiento global en los ecosistemas. No obstante, las plataformas experimentales disponibles suelen ser costosas y poco accesibles para estudiantes universitarios o instituciones que por su naturalidad tienen recursos limitados.

Este proyecto propone el diseño de una cámara aislada térmicamente equipada con sensores e instrumentos de control automatizados, capaz de simular condiciones de altas temperaturas para generar estrés térmico en sujetos de prueba y registrar datos con alta precisión. Utilizando como cerebro del sistema una Raspberry Pi 4 Model B (RPi_b), se ofrece una solución costo-eficiente que sea útil para investigadores, estudiantes y profesionales de las ciencias ambientales. El uso de componentes normalmente aplicados en un gran número de experimentos hogareños garantiza que este prototipo sea accesible, replicable y personalizable para los distintos propósitos de cada usuario. Además, su diseño modular permite la integración de tecnologías avanzadas y su futura ampliación para medir variables adicionales, como CO₂, radiación UV y otros parámetros ambientales y de sitio.

La cámara de calor, nombrada “Heatbox” tiene por fin alcanzar hasta los 60°C al interior del sistema con un rango de humedad relativa entre 20% a 90%, permitiendo a su vez monitorear las condiciones ambientales en tiempo real con el uso de sensores de alta precisión que regularicen automáticamente en torno a un rango definido, logrando así operar de manera continua y confiable durante sesiones prolongadas de exposición de las plántulas. Dentro de las limitaciones del prototipo inicial se pudo prever la dependencia de infraestructura eléctrica, la escala reducida, la durabilidad de los componentes y el tamaño de la unidad muestral.

Es estudiado el desarrollo y puesta en marcha del Heatbox siguiendo el objetivo general: Crear un prototipo de cámara térmica costo-eficiente capaz de simular condiciones de calor extremo y registrar datos de variables ambientales. Acompañado de los siguientes objetivos específicos:

- a) Construir un sistema modular equipado con sensores y elementos tecnológicos, capaz de soportar altas temperaturas y almacenar plántulas de especies vegetales.

- b) Validar el funcionamiento del prototipo comprobando su capacidad para mantener variables ambientales estables dentro de los umbrales definidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Selección de componentes de la cámara

Para el ensamblaje de la cámara se utilizó principalmente madera de pino en distintas formas para armar un módulo de aproximadamente un metro cubico. Para este propósito se necesitaron seis tableros de madera terciada estructural de pino de 9mm, seis planchas de poliestireno expandido (EPS) de 50mm, dieciséis pilares de pino de 4×4cm, seis tableros de MDF de 3mm, veinticuatro láminas de MDF de 3mm (opcional), una lámina de policarbonato de 6mm y tornillos Phillips N°2 de 6mm×2” (Cuadro 1).

Los componentes en un plano y el esquema del Heatbox pueden ser hallados en figura 1 y 2, respectivamente.

Cuadro 1. Materiales y Especificaciones Técnicas. Listado de materiales utilizados. Se incluyen abreviaciones (Abrev.), especificaciones (Esp.), dimensiones en centímetros (Dim.), cantidades requeridas (Cant.), códigos de color (HEX), color en HTML y muestras de color correspondientes para identificación visual. *: Opcional.

Material	Abrev.	Esp.	Dim.	Cant.	HEX	Color HTML	Muestra
Terciado estructural pino	TEP	9mm	122×118	4	A0522D	Sienna	
Terciado estructural pino	TEP	9mm	118×118	2	8B4513	SaddleBrown	
Poliestireno expandido	EPS	50mm	110×110	6	FAFAFA	Snow	
Pilar pino	PP	4×4”	110	8	FF8C00	DarkOrange	
Pilar pino	PP	4×4”	118	8	FF4500	OrangeRed	
Medium Density Fiberboard	MDF	3mm	110×110	6	D2B48C	Tan	
Policarbonato compacto	PCC	6mm	60×28	1	FFFFFF	White	
Medium Density Fiberboard*	MDF	3mm	110,6×5,3	12	D2B48C	Tan	
Medium Density Fiberboard*	MDF	3mm	110×5,3	12	D2B48C	Tan	

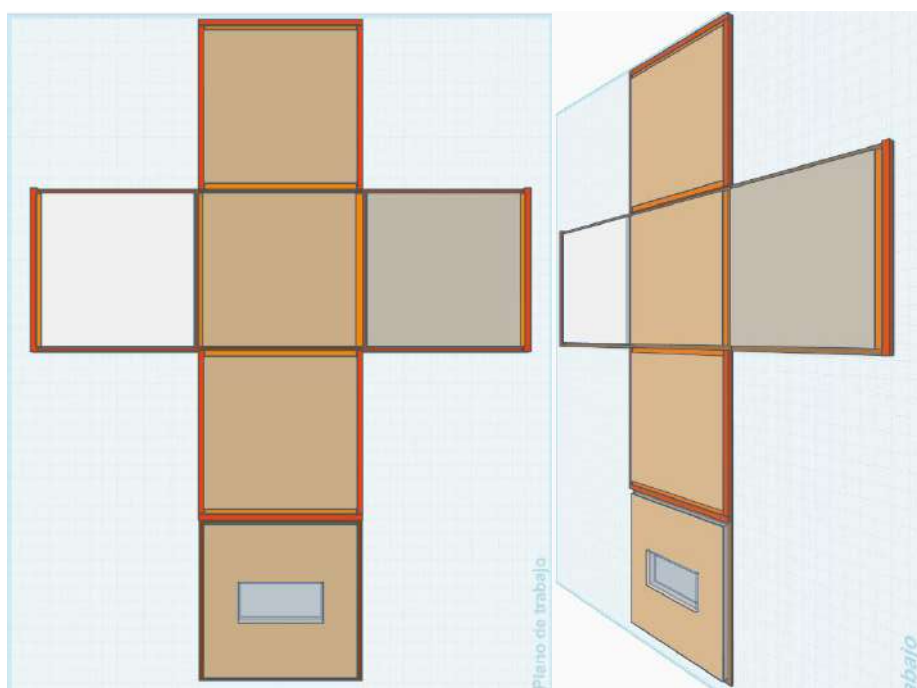


Figura 1. Vista superior (a) y vista en perspectiva (b) del diseño desplegado del Heatbox, elaborado en Tinkercad (AUTODESK). La imagen (a) muestra el diagrama en plano 2D, detallando cada panel que compone el cubo de 1 m^3 , incluyendo los marcos y elementos utilizados en la construcción del prototipo. Por su parte, la imagen (b) ofrece una perspectiva tridimensional del mismo diseño, facilitando la comprensión de la relación espacial entre los paneles, así como la correcta identificación y orientación de cada componente. Ver anexo 1 para detalles de los materiales.

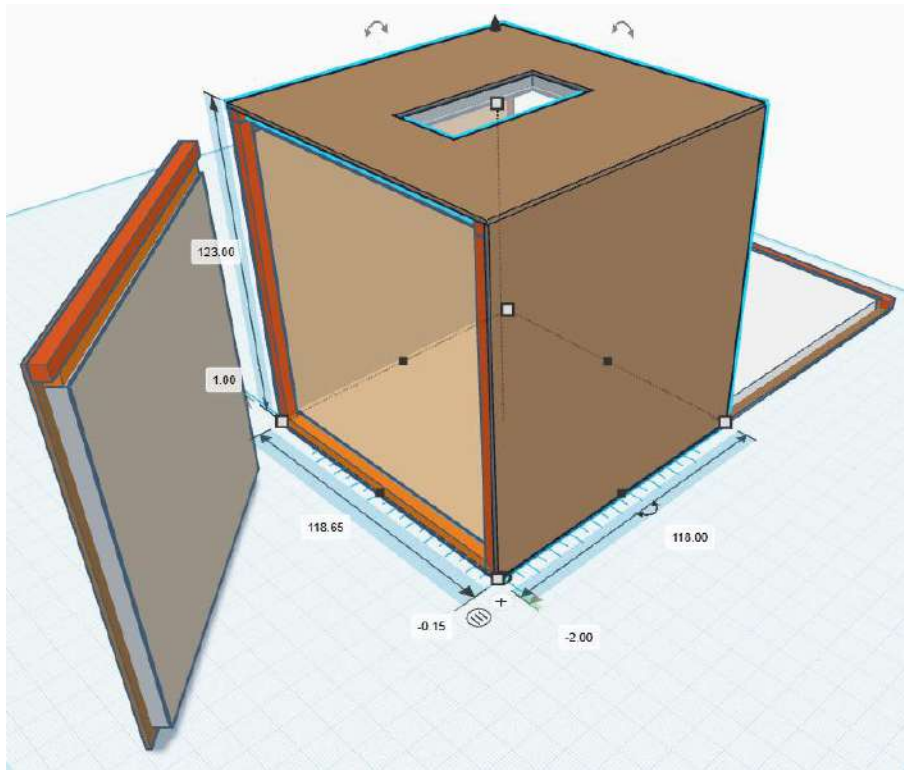


Figura 2. Modelo tridimensional del Heatbox diseñado en Tinkercad (AUTODESK). El modelo presenta una vista en perspectiva desde una esquina superior con ambos paneles laterales abiertos, mostrando la estructura de la cámara y sus componentes diferenciados por colores y medidas externas del prototipo.

2.2 Selección de componentes del controlador al interior del Heatbox

La mayoría de los componentes utilizados en el sistema fueron de fácil acceso para cualquier persona interesada en replicarlo, estando en su mayoría disponibles a través de plataformas como Amazon.

Para la medición de humedad relativa (HR) y temperatura (T°), se instalaron tres sensores DHT-22 (Teyleten Robot, H57-) en los paneles laterales (S-1 y S-2) y el central (S-3), situados a media altura (50 ± 2 cm). Estos sensores fueron cableados directamente a la RPi_b. Para incrementar la temperatura dentro de la cámara, se utilizaron dos lámparas cerámicas de 150W (HealSmart, 840166270615) montadas en portalámparas E26, una posicionada a 20 cm de panel superior de un panel lateral (Heater-1) y la otra en el panel central a $\frac{3}{4}$ de altura desde el piso del Heatbox (Heater-2).

Con el propósito de garantizar una adecuada circulación de aire y evitar la acumulación de aire frío en la zona inferior debido a la dinámica de fluidos, se instalaron dos ventiladores de 12V (MB-

Ambeyond, AV-F7350MB). El primero (FAN-1) se instaló en el panel lateral opuesto a una de las lámparas cerámicas, orientado en diagonal hacia la esquina superior, mientras que el segundo (FAN-2) se dispuso en la arista opuesta de la caja, también apuntando hacia la esquina superior.

Para el control de la HR, se integró un soplador de aire 4" (Seaflo, SFIB1-270-02) con un aditamento de 50 cm³ para almacenar agua. Este sistema permitió que el aire seco ingresara y fuera expulsado con mayor humedad, regulando así este parámetro al interior del Heatbox.

Además, en el panel superior se instaló una luz LED de 23.6" × 11" (Viparspectra, P2000) para proporcionar iluminación adecuada al interior de la cámara.

Finalmente, se agregó un bloque de terminales de conexión rápida de 4 mm² en el panel posterior para facilitar las conexiones eléctricas.

2.3 Selección de componentes del controlador al exterior del Heatbox

Se utilizó una RPi_b (Raspberry Pi, RAS-4-4G) integrada en un módulo F-1019 (CZH-Labs), que incorpora un "Terminal Block Breakout Board", facilitando las tareas de conexión y gestión de señales. Desde este módulo se enviaron y recibieron todas las señales, pulsos e información del prototipo.

El sistema incluyó dos módulos de relés con funciones diferenciadas según su voltaje de salida. El primero fue un módulo de relés de estado sólido de 4 canales (SSR-MODULE) (CZH-Labs, D-1304), utilizado para controlar las lámparas HealSmart de 150W. El segundo correspondió a un módulo de relés electromecánicos de 6 canales (RELAY-12V) (CZH-Labs, D-228), empleado para regular el soplador de aire (BLOWER).

Para reducir el voltaje de 110V a 12V, se utilizó una fuente de alimentación Mean Well (EDR-120-12), conectada a un módulo de distribución de energía con fusibles (DC-PWR) (CZH-Labs, D-1384), encargado de alimentar el hardware correspondiente y proteger el sistema frente a sobreintensidad (overcurrent).

Además, se incorporó un bloque de terminales para la distribución de energía de corriente alterna (AC) al resto del Heatbox, asegurando una conexión eficiente y segura de los distintos componentes eléctricos del sistema.

Todos estos componentes fueron montados sobre rieles DIN, lo que facilitó tanto el ensamblaje como el mantenimiento del sistema.

Más detalles y especificaciones sobre cada sensor y elementos electrónicos utilizados en la Heatbox pueden ser hallado en el anexo 1.

2.4 Diseño del circuito electrónico

Se diseñó un esquema electrónico en EasyEDA Standard 6.5.46 (EasyEDA, 2025), el cual integra los diferentes componentes del sistema (Figura 3).

Inicialmente, la luz LED Viparspectra (LED-LIGHT) se conectó directamente a la corriente alterna, al igual que la fuente de alimentación EDR-120-12 (PWR-SUPPLY) y el bloque de terminales (TERMINAL-BLOCK).

Posteriormente, desde la EDR-120-12, se suministró energía a DC-PWR, el cual distribuyó la alimentación de manera continua a los ventiladores FAN-1 y FAN-2, y al BLOWER, a través del RELAY-12V.

Los sensores S-1, S-2 y S-3 se conectaron a RPi_b mediante una resistencia pull-up de 10k Ω , garantizando la estabilidad de la señal.

Finalmente, HEATER-1 y HEATER-2 fueron conectados al SSR-MODULE y energizados a través del TERMINAL-BLOCK. La activación de estas lámparas cerámicas se realizó mediante la señal enviada desde RPi_b al SSR-MODULE.

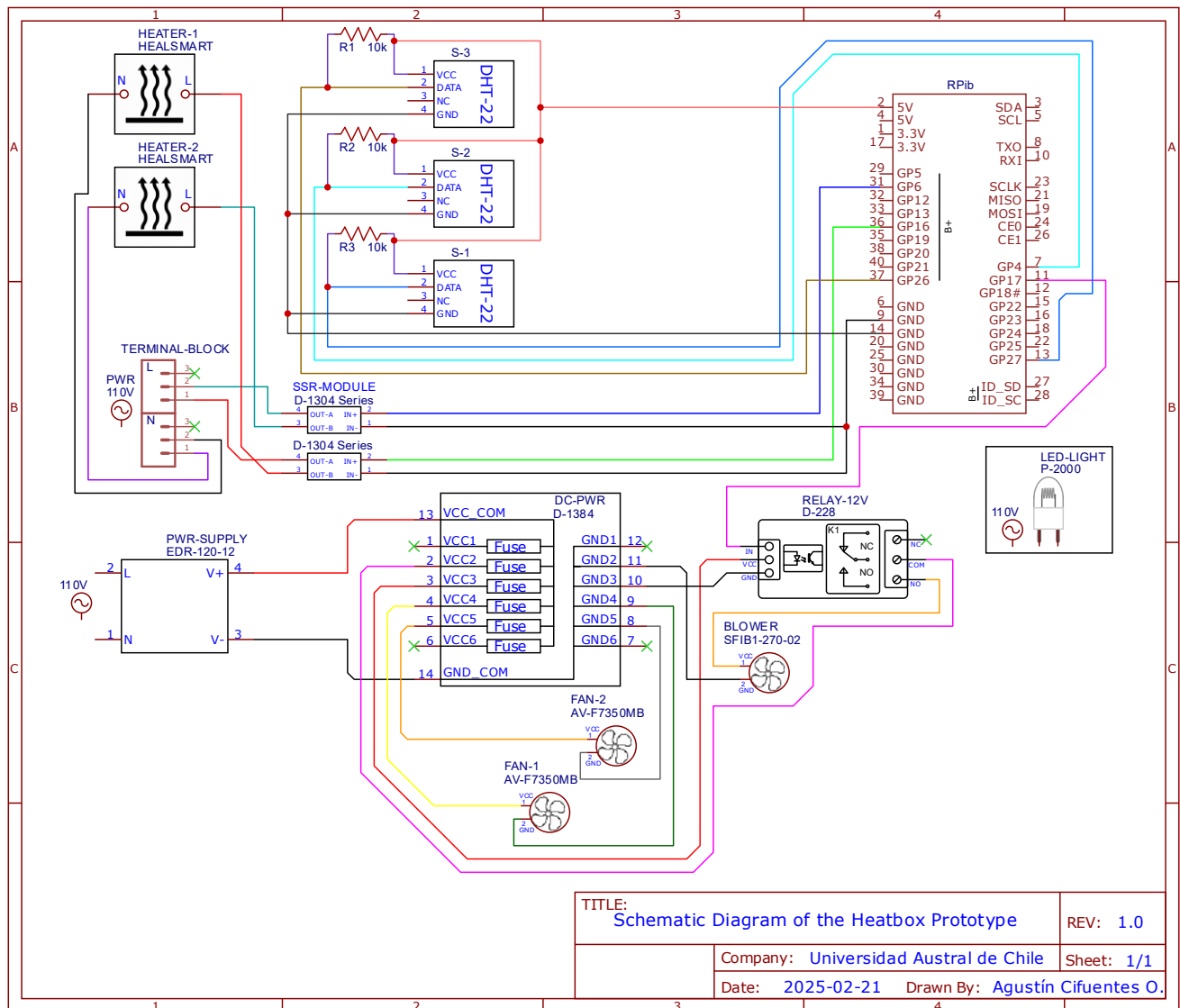


Figura 3. Diagrama esquemático del prototipo de Heatbox. Se observa la distribución de energía, el cableado y conexión de los sensores, ventiladores y lámparas, y la integración con RPi_b para la automatización del sistema.

2.5 Programación y creación sistema de control

Para regular la T° y la HR, así como para recoger datos de distintos elementos dentro de la cámara, se desarrolló un código en Python 3.10 utilizando el entorno de desarrollo Thonny 4.1.4, incluido con el sistema operativo Raspberry Pi incluido en la RPi_b. Este desarrollo se apoyó en diversas librerías, destacando las de Adafruit, reconocidas por su amplio repertorio y compatibilidad con el hardware utilizado, además de contar con una activa comunidad que crea y comparte bucles (loops) en plataformas como GitHub, lo que facilita y acelera el proceso de scripting. El código completo puede ser revisado en el Anexo 2.

Adicionalmente, se elaboró un protocolo de uso basado en el código desarrollado, con el objetivo de simplificar su implementación para usuarios no especializados. Detalles específicos pueden encontrarse en el Anexo 3.

2.6 Validación del código y el prototipo

Preliminarmente, se ejecutó y depuró el código para asegurar su correcto funcionamiento. Una vez validado el código, se realizaron pruebas en los sensores S-1, S-2 y S-3, exponiéndolos a una fuente de calor y luego a un ambiente húmedo. Los datos obtenidos fueron comparados con los de un datalogger HOBO (MX2301A) y, al ser consistentes, no se requirieron ajustes adicionales.

Se evaluó la capacidad del Heatbox de alcanzar y mantener estables las variables HR y T° , se realizó una prueba de 3 horas y 30 minutos, con mediciones registradas cada minuto. Durante este único ensayo, se estableció como objetivo alcanzar temperaturas de 30°C y 40°C. Para mayores temperaturas no se realizaron pruebas. El análisis estadístico fue realizado en R (4.4.1) mediante RStudio (2024.12.1+563).

3. RESULTADOS

Se materializó el Heatbox luego del ensamblaje del prototipo consiguiendo así una caja cerrada de 1m^3 aproximadamente, integrando cada componente dispuesto (figura 4).

A través de la recolección de datos se obtuvo la estadística descriptiva de T° y HR (cuadro 2).

Cuadro 2. Resumen estadística descriptiva de la muestra. Promedio (Prom.), desviación estándar (D.E.), mínimo (Mín.) y máximo (Máx).

Estadística	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Humedad relativa (%)
Prom.	32,67	53,44
D.E.	4,71	5,22
Mín.	21,93	43,2
Máx.	39,83	62,93

Al inicio del experimento, la temperatura dentro del Heatbox era de $21,93^\circ\text{C}$. Para alcanzar los 30°C deseados, la cámara tardó 32 minutos, lo que equivale a un ritmo promedio de $4\text{ min}/^\circ\text{C}$. Sin embargo, en la fase inicial del calentamiento, el aumento de 22°C a 23°C tomó 7 minutos, evidenciando una menor eficiencia en el arranque (figura 5). Una vez alcanzada la temperatura umbral, esta se mantuvo estable, con una media de $30,15 \pm 0,27^\circ\text{C}$ y un coeficiente de variación de $0,91\%$, lo que indica una buena estabilidad térmica en términos relativos (figura 6).

Por su parte, la humedad relativa (HR) inició en $62,5\%$, disminuyendo de manera progresiva hasta un mínimo de $55,97\%$ a medida que la temperatura aumentaba. Durante el período de 30 a 90 minutos, la HR se mantuvo con una media de $56,8 \pm 0,61\%$ (figura 6) y un coeficiente de variación de $1,08\%$, lo que sugiere un comportamiento relativamente estable. No obstante, a las 1:35 horas, se registró una caída abrupta de $2,2^\circ\text{C}$ en temperatura y $12,43\%$ en HR, seguida de un aumento del $17,6\%$ en humedad relativa a las 1:38 horas.

A partir de este punto, el sistema se configuró nuevamente para alcanzar 40°C . En los primeros 12 minutos, la temperatura ascendió hasta 31°C , con un ritmo de aumento de $5\text{ min}/^\circ\text{C}$ hasta alcanzar 34°C . Sin embargo, superar este umbral y llegar a 40°C tomó 54 minutos ($9\text{ min}/^\circ\text{C}$), reflejando una desaceleración en el proceso de calentamiento.

En cuanto a la HR, se observaron un par de fluctuaciones con valles y picos a lo largo de las segunda parte de la evaluación, hasta estabilizarse en un descenso progresivo desde 3 horas de prueba hasta el final (Figura 5).

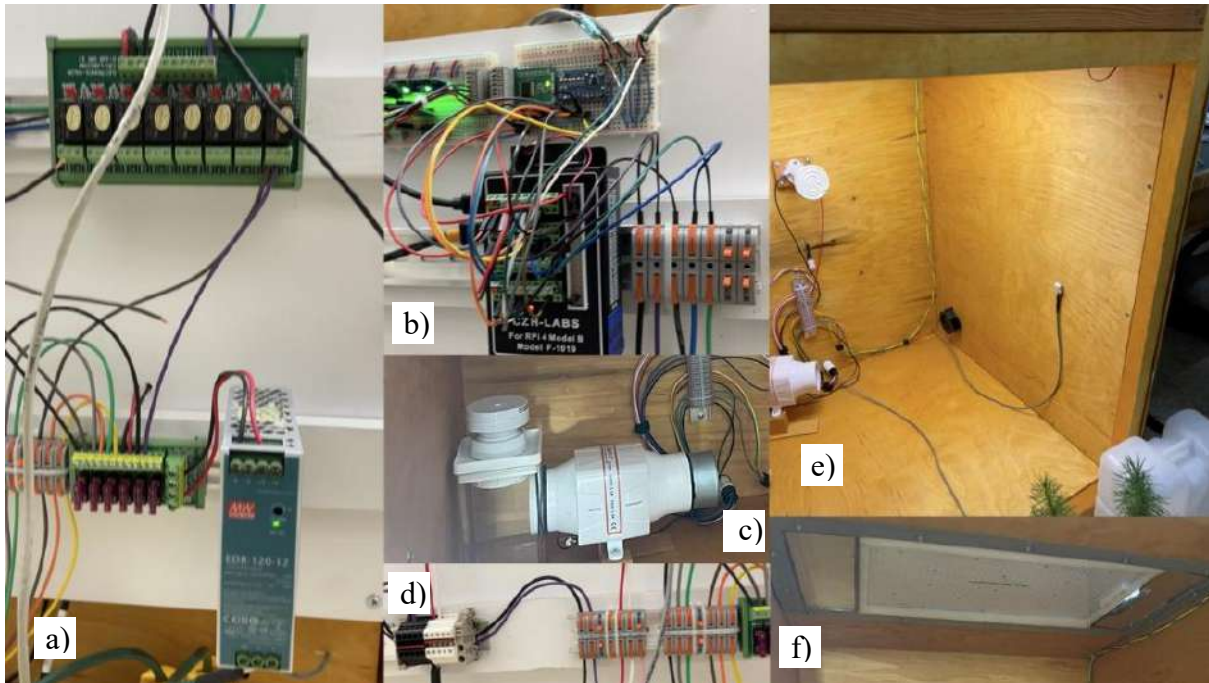


Figura 4. Montaje final del Heatbox. La imagen muestra a) conexión desde PWR-SUPPLY hasta RELAY-12V, pasando por DC-PWR; b) cableado de los sensores S-1, S-2 y S-3 hacia la RPi; c) BLOWER; d) energización desde el terminal-block hacia un módulo de conexión rápida; e) interior del Heatbox, donde se observan S-1, FAN-1, módulo de conexión rápida, BLOWER y HEATER-1; y f) LED-LIGHT.

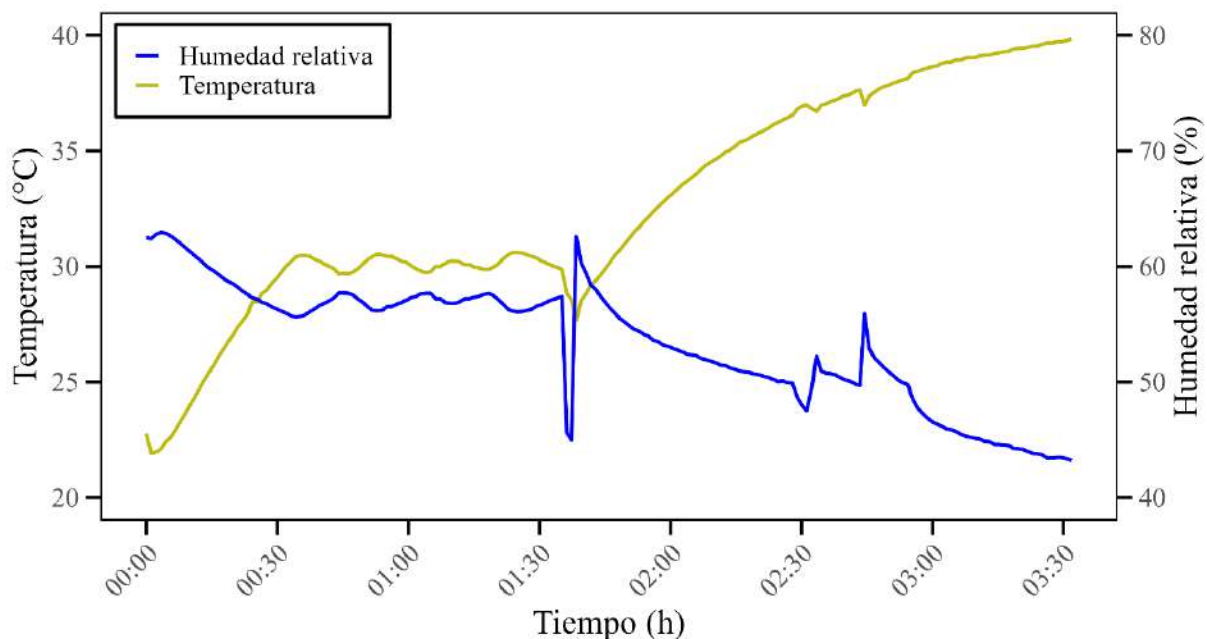


Figura 5. Evolución de la temperatura (°C) y humedad relativa (%) dentro del Heatbox durante el proceso de validación y depuración.

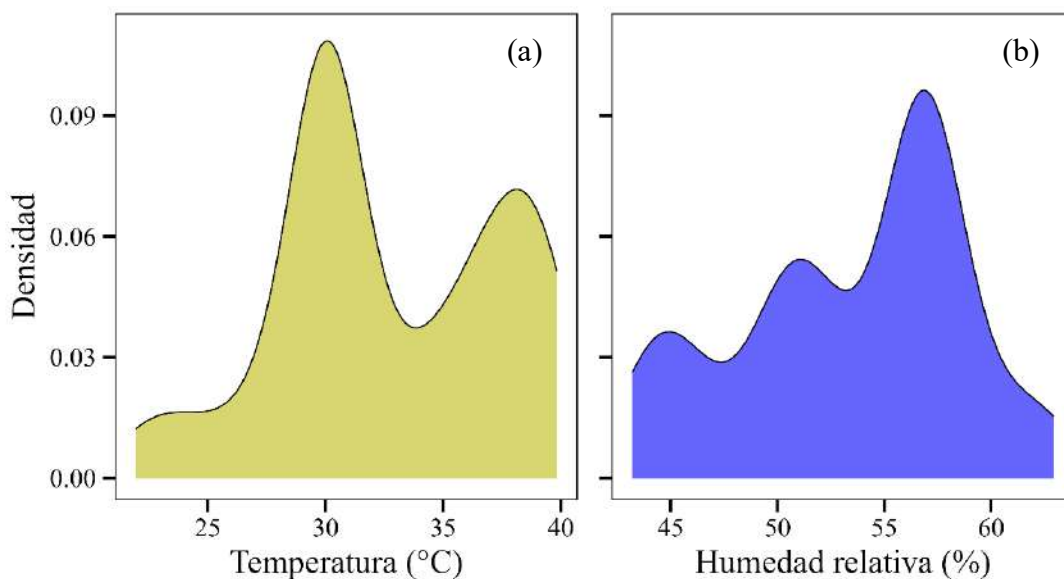


Figura 6. Gráfico de densidad para temperatura (a) y HR (b). La representación muestra la distribución de los valores registrados en el conjunto de datos. En (a), se observa un área alta y estrecha, reflejando la estabilidad de la temperatura en 30°C durante gran parte del experimento. En (b), el pico principal se sitúa cerca del valor más estable del ensayo, pero la distribución presenta un área bajo la curva más ancha y plana en comparación con (a), evidenciando una mayor variabilidad en la HR a lo largo del experimento.

4. DISCUSIÓN

El objetivo del informe se logra parcialmente, ya que se valida el correcto funcionamiento del prototipo tanto en su construcción como en la recopilación de datos. Sin embargo, no se logró comprobar si el prototipo es capaz de alcanzar temperaturas iguales o superiores a 60°C, ni mantener la HR dentro del rango objetivo de 20%-90%. El Heatbox demora 7 minutos en aumentar el primer grado Celsius, lo que se atribuye al tiempo de calentamiento de los HEATERS. Posteriormente, alcanza una T° parcialmente estable de 40°C, aunque con una desaceleración del 55.6% respecto al ritmo encontrado al inicio del experimento (4 min/°C). Esto probablemente se deba a fugas térmicas derivadas de un hermetismo insuficiente del prototipo, lo que podría corregirse con la aplicación de sellantes en las aristas del cubo.

Además, se registran fluctuaciones en la HR, que podrían sesgar resultados en otro tipo de experimentos, pero que en este caso evidencian la sensibilidad de los sensores ante cambios abruptos en el entorno, lo cual no necesariamente representa un hallazgo negativo. Estas variaciones son ocasionadas por la necesidad de abrir el sistema para rociar agua manualmente en un intento de estabilizar la humedad, reflejando principalmente limitaciones técnicas asociadas al sistema de humidificación empleado (BLOWER), específicamente debido a que no se generan aerosoles en el interior del sistema. En consecuencia, el aire seco entrante no se humedece eficazmente. Sugiriendo que una solución adecuada sería incorporar un dispositivo capaz de formar burbujas para saturar el aire seco con partículas de agua.

Los resultados también demostraron que el aumento de la T° se condice con una disminución de la HR, en concordancia con lo reportado por Billon et al. (2020) en el desarrollo de la DroughtBox (Caja de sequía), un sistema similar al Heatbox, pero diseñado para otros fines. Dichos investigadores utilizaron un generador de burbujas (bubbler) para controlar la HR, logrando así resultados satisfactorios.

Si bien el prototipo no alcanza todos los valores objetivo, al menos se especula que con más tiempo de experimentación si se hubieran logrado. Mientras que en este estudio la prueba duró 3:30 horas, Billon et al. (2020) realizaron simulaciones por hasta 90 horas, lo que podría indicar una limitación del alcance de los resultados por falta de tiempo de prueba. Asimismo, los sensores DHT-22 presentan una precisión condicionada¹ ($\pm 5\%$ HR y $\pm 0.5^\circ\text{C}$), lo que introduce una incertidumbre inherente en las mediciones, a pesar de contar con tres unidades para minimizar la variabilidad.

¹ Hoja de datos del sensor DHT-22. <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>

A pesar de que los autores previamente citados han empleado tecnologías similares en su experimento, hasta la fecha no existe una herramienta con las mismas características de replicabilidad, accesibilidad y eficiencia que la presentada en este estudio. Aunque el Heatbox tal como está, tiene limitaciones en cuanto a escala, se destaca por su bajo costo de implementación, lo que lo hace una alternativa viable frente a cámaras climáticas comerciales como las de Percival Scientific o Conviron², Fitotron, growth chambers u otros sistemas similares, cuyos precios suelen superar los \$10,000 USD según sus especificaciones. En contraste, el Heatbox se basa en una arquitectura modular, lo que permite su personalización y expansión a una décima parte del costo, con una inversión actual de \$860 USD, considerando un margen adicional del 10%.

No obstante, el presupuesto también implica ciertas limitaciones, como la falta de refrigeración activa y un control de humedad más sofisticado mediante ciclos de deshumidificación y humidificación. Aun así, el Heatbox compensaría estas carencias con un control pasivo eficiente, optimizando el uso de energía.

A partir de los resultados obtenidos, se identifican aspectos clave que requieren optimización, en particular la capacidad calorífica para mejorar la eficiencia del sistema y el desempeño del BLOWER. Asimismo, es necesario aislar térmicamente la parte aérea de la planta respecto al sistema radical, lo que podría lograrse envolviendo cada contenedor en hojas de aislamiento reflectante de burbujas, evitando la exposición de las raíces al calor.

Dado que el Heatbox está diseñada para simular condiciones de estrés térmico, y considerando la estrecha relación entre sequía y calor, es esencial estudiar estos fenómenos de manera aislada. Las proyecciones climáticas indican que las olas de calor afectarán tanto suelos susceptibles a sequías como aquellos perturbados por precipitaciones, lo que resalta la necesidad de comprender los efectos diferenciados en el establecimiento de las plántulas, al ser el estadio más vulnerable de las plantas (Hao et al. 2013, Marias et al. 2016).

Este conocimiento no solo contribuye a la conservación y ecología forestal, sino que también tiene implicancias para la silvicultura comercial, al permitir evaluar el desempeño de genotipos en un rango climático más amplio, en contraste con aquellos que han sido adaptados para condiciones más restringidas.

² Conviron desde su sitio web oficial menciona que el rango puede oscilar desde 5 mil hasta 1 millón de USD. conviron.com/insights/what-is-the-cost-of-a-plant-growth-chamber/

En términos de control y automatización, las cámaras comerciales emplean sensores industriales de alta precisión y software cerrados propios de cada fabricante para la gestión de los datos. Por su lado, la primera versión del Heatbox incorpora sensores DHT-22 no tan avanzados, pero ofrece claras opciones de mejora, como la integración de sensores SHT31 o AM2315C, que incrementarían la precisión de las mediciones y la frecuencia de evaluación.

Una de las mayores ventajas de la cámara diseñada es su flexibilidad y versatilidad. A diferencia de los sistemas cerrados comerciales, el Heatbox comienza desde una cámara de crecimiento para plántulas y permite integrar sensores adicionales, modificar el código Python de control y adaptar el hardware según las necesidades específicas de cada experimento. Como próximo paso, se plantea incorporar una serie de lisímetros para evaluar la evapotranspiración de las plántulas, siguiendo un enfoque similar al trabajo realizado por McCauley y Nackley (2021) pero a través de sensores LSP-10 (Transducer Techniques) utilizando el peso de las plántulas como proxy.

Finalmente, esta primera versión del Heatbox representa un avance significativo hacia el desarrollo de una herramienta científicamente confiable, energéticamente eficiente, accesible e innovadora para la investigación en fisiología vegetal. En futuras versiones, se deberán mejorar aspectos como el hermetismo térmico, la calidad de los sensores, la circulación del aire, y se podrán integrar nuevas funciones como conectividad inalámbrica y sensores adicionales (O_2 , CO_2 , UV, COVs, humedad de suelo, etc.). Asimismo, será clave optimizar la separación entre la parte aérea y radicular de las plántulas para mejorar la precisión en los estudios de estrés térmico.

5. CONCLUSIÓN

Aunque la cámara no logró alcanzar y mantener una temperatura estable de $65^{\circ}C$, ni fluctuar dentro de los límites de humedad relativa (HR) deseados, el Heatbox se plantea como una herramienta de bajo costo y alto potencial científico, con el propósito de ampliar el acceso a la experimentación en condiciones de estrés térmico. Sin embargo, en su estado actual, cumple solo parcialmente con el objetivo específico b), debido a limitaciones técnicas propias de un prototipo en desarrollo. A pesar de contar con mediciones precisas en las variables evaluadas, el sistema aún requiere mejoras en su tecnología y en los detalles constructivos. No obstante, con un mayor desarrollo, este prototipo podría convertirse en una herramienta altamente útil para estudios a pequeña escala, destacando por su accesibilidad y flexibilidad.

En esta primera versión, funciona de manera óptima como cámara de crecimiento, siendo apta para experimentos que no requieran condiciones especializadas.

Desde una perspectiva metodológica, el prototipo cumple con el objetivo general, ya que proporciona las bases necesarias para su elaboración y replicabilidad. De aquí en adelante, su aplicación dependerá de las necesidades específicas de cada usuario. Sin embargo, es evidente que el desempeño aumenta al optimizarse los sistemas y usar sensores más precisos permitiendo reducir la incertidumbre en las mediciones y mejorar la estabilidad del sistema. Estas modificaciones hacen del Heatbox una herramienta aún más confiable para estudios científicos, manteniendo su ventaja competitiva en términos de costo y accesibilidad.

Este proyecto representa un avance significativo en el desarrollo de herramientas accesibles para el estudio del estrés térmico, la fisiología vegetal y la conservación de recursos naturales. Su desarrollo es especialmente relevante en el contexto del cambio climático, donde la necesidad de comprender los efectos de los eventos extremos es cada vez más urgente.

6. REFERENCIAS

- (CR)2. 2023. 10 Years Report. Consultado mar. 2024. Disponible en https://www.cr2.cl/eng/wp-content/uploads/2024/03/10YearsReport_CR2.pdf
- Billon L, Blackman C, Cochard H, Badel E, Hitmi A, Cartailier J, Torres-Ruiz J. 2020. The DroughtBox: A new tool for phenotyping residual branch conductance and its temperature dependence during drought. *Plant, Cell & Environment* 43(7): 1584–1594. <https://doi.org/10.1111/pce.13750>
- Chaves-Barrantes N. 2017. Replicating sawmill sawing with topsan using C.T. images of a full-length hardwood log. *Agronomía Mesoamericana* 28(1):72-75. <https://dx.doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, Chile). 2021. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile al año 2020. Consultado jul. 2024. Disponible en sit.conaf.cl/varios/Catastros_Recurso_Vegetacionales_Nativos_de_Chile_Nov2021.pdf
- EasyEDA. 2025. EasyEDA - Online PCB design & circuit simulator. Consultado feb. 2025. Disponible en <https://easyeda.com>
- Hao Z, AghaKouchak A, Phillips T. 2013. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environmental Research Letters* 8(3): 1-7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034014>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. IPCC Factsheet: What is the IPCC?. Consultado dic. 2024. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/FS_what_ipcc.pdf
- IPCC. 2023. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Marias D, Meinzer F, Still C. 2016. Leaf age and methodology impact assessments of thermotolerance of *Coffea arabica*. *Trees* 31: 1091-1099. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1476-4>

- Marias D, Meinzer F, Woodruff D, McCulloh K. 2017. Thermotolerance and heat stress responses of Douglas-fir and ponderosa pine seedling populations from contrasting climates. *Tree Physiology* 37(3): 301–315. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw117>
- McCauley D, Nackley L. 2022. Development of mini-lysimeter system for use in irrigation automation of container-grown crops. *HardwareX* 11. e00298. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00298>
- Méndez-Espinoza C, Vallejo M. 2019. Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. En *Revista mexicana de ciencias forestales* 10(56): 33-64. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA). 2020. ¿Qué es el SINIA?. Sistema Nacional de Información Ambiental. Consultado en dic. 2024. Disponible en <https://sinia.mma.gob.cl/que-es-el-sinia/>.

Anexos

Anexo 1. Detalle de costos. Se incluye un listado por componente y materiales utilizados en el montaje del prototipo y sus respectivos valores, además el cuadro entrega el producto, su marca comercial o fabricante (Fab.), el modelo o especificación (Esp.), la cantidad requerida (Cant.), el precio unitario (Uni.), el costo total por ítem y un enlace de referencia para consulta.

#	Producto	Marca / Fab.	Modelo / Esp.	Cant.	Precio Uni. (USD)	Total (USD)	Enlace
1	Terciado estructural pino	Genérico	9 mm × 1,22 m × 2,44 m	3	20.00	60.00	Ver producto
2	Poliestireno expandido	Genérico	50 mm × 1,00 m × 0,50 m	15	16.04	19.41	Ver producto
3	Pilar pino	Genérico	4 cm × 4 cm × 3,20 m	6	31.66	189.96	Ver producto
4	Medium Density Fiberboard (MDF)	Genérico	3 mm × 1,52 m × 2,44 m	3	9.94	29.82	Ver producto
5	Polycarbonato compacto	Extralite	6 mm × 3,20 m × 1,22 m	1	180.00	7.20	Ver producto
6	Tornillos Phillips N°2	Mamut	6 mm × 2 mm (1 pack)	1	3.95	3.95	Ver producto
7	Sensores DHT-22	Teyleten Robot	H57-	3	3.33	9.99	Ver producto
8	Lámpara cerámica de calor	HealSmart	840166270615	2	4.89	9.77	Ver producto
9	Ventilador brushless 12V	MB-Ambeyond	AV-F7350MB	2	6.99	13.98	Ver producto
10	Soplador de aire	Seaflo	SFIB1-270-02	1	34.99	34.99	Ver producto
11	Luz LED	VIPARSPECTRA	P2000	1	149.99	149.99	Ver producto
12	Raspberry Pi 4 Model B	Raspberry Pi	RAS-4-4G	1	61.89	61.89	Ver producto
13	Módulo Bloque Terminal	CZH-LABS	F-1019	1	32.00	32.00	Ver producto
14	Módulo SSR	CZH-LABS	D-1304	1	30.00	30.00	Ver producto
15	Módulo de relés 12V	CZH-LABS	D-228	1	35.00	35.00	Ver producto
16	Fuente de alimentación	Mean Well	EDR-120-12	1	41.54	41.54	Ver producto

17	Módulo de distribución de energía	CZH-LABS	D-1384	1	28.00	28.00	Ver producto
18	Cables	MADECO	2.5 mm × 50 m	1	25.00	25.00	Ver producto

Anexo 2. Código Python para el Control del Heatbox.

```
import time
import csv
import os
import board
import adafruit_dht
import RPi.GPIO as GPIO # Importa la librería GPIO
from datetime import datetime

# Configuración de los pines GPIO para los sensores DHT22
dht_heater = adafruit_dht.DHT22(board.D4) # DHT22 para Heater
dht_wall = adafruit_dht.DHT22(board.D27) # DHT22 para pared
dht_mid = adafruit_dht.DHT22(board.D26) # DHT22 en el medio

# Configuración de los pines GPIO para los relés
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
heater_a_pin = 6
heater_b_pin = 16
humidifier_pin = 17

GPIO.setup(heater_a_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(heater_b_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(humidifier_pin, GPIO.OUT)

# Función para obtener mediciones de temperatura y humedad del aire
con reintentos
def get_sensor_data(retries=5, delay=2):
    for _ in range(retries):
        try:
            temp_heater = dht_heater.temperature
            rh_heater = dht_heater.humidity

            temp_wall = dht_wall.temperature
            rh_wall = dht_wall.humidity

            temp_mid = dht_mid.temperature
            rh_mid = dht_mid.humidity

            # Validar que los sensores devuelvan valores antes de continuar
            if None in (temp_heater, rh_heater, temp_wall, rh_wall, temp_mid, rh_mid):
```

```

    raise RuntimeError("Datos de sensor inválidos")

# Mostrar los datos individuales de cada sensor
print(f"Sensor          Heater:          Temp={temp_heater}°C,
Humedad={rh_heater}%")
print(f"Sensor Wall: Temp={temp_wall}°C, Humedad={rh_wall}%")
print(f"Sensor Mid: Temp={temp_mid}°C, Humedad={rh_mid}%")

# Promedio de temperatura y humedad
avg_temp = round((temp_heater + temp_wall + temp_mid) / 3, 2)
avg_rh = round((rh_heater + rh_wall + rh_mid) / 3, 2)

return avg_temp, avg_rh

except RuntimeError as e:
    print(f"Error al leer los sensores: {e}. Reintentando...")
    time.sleep(delay)

# Si después de los reintentos no se obtiene una medición válida
print("No se pudieron obtener lecturas de los sensores después de
varios intentos.")
return None, None

# Función para controlar los heaters
def control_heaters(avg_temp):
    if avg_temp is not None:
        if avg_temp < 40.0:
            GPIO.output(heater_a_pin, GPIO.HIGH) # Enciende Heater A
            GPIO.output(heater_b_pin, GPIO.HIGH) # Enciende Heater B
        else:
            GPIO.output(heater_a_pin, GPIO.LOW)   # Apaga Heater A
            GPIO.output(heater_b_pin, GPIO.LOW)   # Apaga Heater B

# Función para controlar el humidificador
def control_humidifier(avg_rh):
    if avg_rh is not None:
        if avg_rh < 50.0:
            GPIO.output(humidifier_pin, GPIO.HIGH) # Enciende humidificador
        else:
            GPIO.output(humidifier_pin, GPIO.LOW)  # Apaga humidificador

# Función para guardar los datos en CSV
def save_data_to_csv(timestamp, temp, rh):
    if temp is None or rh is None:
        return # Evita guardar datos inválidos

file_exists = os.path.isfile('data.csv')
with open('data.csv', mode='a', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file)
# Si el archivo no existe, escribir el encabezado
if not file_exists:
    writer.writerow(['Timestamp', 'Temperature (C)', 'Humidity (%)'])
# Escribir los datos

```

```

writer.writerow([timestamp, temp, rh])

# Ciclo principal
def main_loop():
    while True:
        try:
            # Toma las mediciones de temperatura y humedad del aire
            avg_temp, avg_rh = get_sensor_data()

            # Si los sensores fallan, esperar y continuar
            if avg_temp is None or avg_rh is None:
                print("No se obtuvieron datos válidos. Esperando antes de
reintentar...")
                time.sleep(15)
                continue

            # Controla heaters y humidificador
            control_heaters(avg_temp)
            control_humidifier(avg_rh)

            # Guarda los datos en CSV
            timestamp = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
            save_data_to_csv(timestamp, avg_temp, avg_rh)

            # Mostrar el promedio en la consola
            print(f"{timestamp} - Promedio Temp: {avg_temp}°C, Promedio
Humedad: {avg_rh}%\n")

            # Espera 60 segundos antes de la siguiente medición
            time.sleep(60)

        except Exception as e:
            print(f"Error: {e}. Reintentando en 15 segundos...")
            time.sleep(15)

if __name__ == "__main__":
    try:
        main_loop()

    except KeyboardInterrupt:
        print("Terminando programa.")

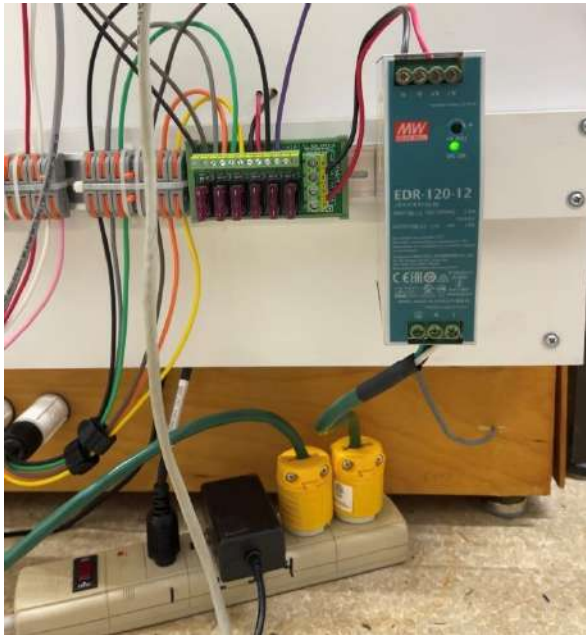
    finally:
        dht_heater.exit()
        dht_wall.exit()
        dht_mid.exit()
        GPIO.cleanup()

```

Anexo 3. Protocolo de uso Heatbox v1.0

1. Revisar conexiones (de derecha a izquierda)

- 1.1. Enchufe amarillo: conexión power supply AC-DC (110v-12v)
- 1.2. Enchufe amarillo: conexión terminal block AC 110v.
- 1.3. Bloque negro: conexión a RPi 4 Model B, asegurarse que el switch On/Off permita el paso de corriente.
- 1.4. Enchufe negro: conexión a lampara LED.



2. Inicialización del sistema.

- 2.1. No debería pedir usuario, pero en caso de, utilizar Username: Heatbox; Password: VMRC2024.
- 2.2. Una vez en el escritorio, presionar el *botón de inicio*, seleccionar *Programming* y luego *Thonny*.



- 2.2.1. *Thonny* es el visualizer que utilicé, por defecto en la RPi se utiliza Geany, pero es indiferente.
- 2.3. Con el visualizer abierto se debe abrir el script correspondiente presionando el *diskette con la flecha hacia arriba*, el utilizado para las últimas mediciones es *I2C.py*.

2.4. El código debería lucir así:

```
i2c.py
1 import time
2 import csv
3 import os
4 import board
5 import adafruit_dht
6 import RPi.GPIO as GPIO # Importa la librería GPIO
7 import Adafruit_ADS1x15 # Importa la librería para el ADS1115
8 from datetime import datetime
9
10 # Inicializa el ADS1115 con el bus I2C adecuado
11 adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1115(busnum=1)
12 GAIN = 1 # Ganancia del ADS1115, ajusta según necesites
13
14 # Calibración: Ajusta estos valores según tus mediciones específicas
15 dry_value = 4400 # Valor del sensor en suelo completamente seco
16 wet_value = 4700 # Valor del sensor en suelo completamente húmedo
17
18 # Configuración de los pines GPIO para los sensores DHT22
19 dht_heater = adafruit_dht.DHT22(board.D4) # DHT22 para Heater
20 dht_wall = adafruit_dht.DHT22(board.D27) # DHT22 para pared
21 dht_mid = adafruit_dht.DHT22(board.D26) # DHT22 en el medio
22
23 # Configuración de los pines GPIO para los relays
24 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
25 heater_a_pin = 6
26 heater_b_pin = 16
27 humidifier_pin = 17
28
29 GPIO.setup(heater_a_pin, GPIO.OUT)
```

2.5. Los valores en este **color** son generalmente aquellos atributos que pueden sufrir modificaciones a medida que se utiliza el código.

3. Partes del código.

- 3.1. Líneas 1-8: Importa las librerías utilizadas a lo largo del código.
- 3.2. Líneas 10-12: Uso del módulo convertidor de señales analógicas a digitales (ADS1115). Es importante notar el GAIN, este dependerá del rango de voltaje de los sensores que se estén utilizando. Para un sensor de soil moisture, que normalmente trabaja en un rango de 0V a 3.3V o 5V, un GAIN de 1 ($\pm 4.096V$) es una buena opción, ya que cubre ese rango y da una buena precisión.
- 3.3. Líneas 14-16: Estos valores deben ser ajustados utilizando una comparación precisa de otro sensor ya calibrado, a la fecha de este protocolo ese umbral fue lo más cercano a la realidad, aunque no es significativamente confiable.
- 3.4. Líneas 18-21: Corresponde a la configuración de los sensores DHT22 para temperatura y humedad relativa. dht_heater, corresponde al sensor ubicado en la misma pared lateral que el heater (a.); dht_mid, corresponde al sensor ubicado en la pared central en donde están los wire quick connector; dht_wall, corresponde al sensor ubicado en la pared lateral opuesta a dht_heater. No deberían haber modificaciones a menos que haya un cambio de pin, en dicho caso se debe modificar la parte entre paréntesis y ajustar el (board.Dx) reemplazando la x por el pin correspondiente.
- 3.5. Líneas 23-27: Configuración de relays. De esta sección se determina desde que dirección se debe enviar la señal para controlar el On/Off ajustado a los parámetros, ver líneas 80-93. Los heaters a y b y el humidificador están conectados a los pines GPIO del RPi 6, 16 y 17, respectivamente.
- 3.6. Líneas 33-37: convierte la señal analógica del sensor de humedad en porcentaje de humedad del suelo, respecto a los valores límite fijado en las líneas 15 y 16.
- 3.7. Líneas 39-45: Esta función reduce el ruido o las variaciones instantáneas que podrían estar presentes en una única lectura del ADC, lo que da como resultado una medición más precisa y confiable.
- 3.8. Líneas 47-77: Obtiene e imprime en la consola la temperatura y humedad relativa para cada sensor DHT22, el sensor es conocidamente inestable, por lo que el código reintenta una lectura hasta 5 veces cada 2 segundos en caso de no obtener un feedback, si en ese lapso no hay respuesta, se omite ese ciclo

y se deja descansar al sensor hasta la siguiente lectura, configurado en la línea 133 para que sean 60 segundos.

- 3.9. Líneas 79-93: Controla el funcionamiento de los heaters y humidificador. Establece temperatura deseada en la línea 81, actualmente configurado para alcanzar los 40°C y lo mismo para RH, en la línea 90, actualmente configurado para alcanzar 50%.
- 3.10. Si bien no hay un margen de $\pm x$ °C o RH, el código no los necesita ya que; los heaters siguen generando calor por un cierto periodo de tiempo, por ende al llegar a la temperatura deseada y los relays corten el suministro de energía es probable que la cámara alcance a elevar un poco más la temperatura y cuando esté por debajo el umbral los heaters sigan calientes alcanzando rápidamente el umbral nuevamente. Con la RH, es similar ya que el sistema es parcialmente cerrado, por ende no varía significativamente entre cada ciclo de medición.
- 3.11. Líneas 95-104: Este loop guarda toda la información recolectada por los sensores en un archivo .csv nombrado data, el nombre puede modificarse cambiando el ‘ en la línea 97. Las columnas del .csv contendrán: 'Timestamp', 'Temperature (C)', 'Humidity (%)', 'Soil Moisture 1 (%)', 'Soil Moisture 2 (%)', actualmente. Para agregar sensores de humedad se debe agregar a la línea 102: 'Soil Moisture [n] (%)', reemplazando el [n] por el número del canal al cual está conectado en el multiplexor ese sensor, **debe ser de forma secuencial**, o sea sin saltarse canales.
- 3.12. Línea 106-137: Loop principal y aplicación de funciones definidas en secciones precedentes.
- 3.13. Líneas 109-111: Con la función definida en línea 48, obtiene el promedio de temperatura y RH para almacenarlo en la memoria y continuando la secuencia, escribirlo en el archivo csv.
- 3.14. Líneas 113-119: Con la función definida en línea 34, obtiene la humedad del suelo para los sensores indicados y posteriormente se almacena en la memoria y continuando la secuencia, es escrito en el archivo csv.
- 3.15. Línea 121-123: Controla On/Off de los heaters según temperatura.
- 3.16. Línea 125-127: Guarda los datos en el archivo csv. De agregar sensores, se debe agregar las columnas correspondientes.
- 3.17. Línea 130: Indica los valores obtenidos en la consola de Thonny, de agregarse sensores, se debe agregar en esta parte, caso contrario, no se verá un valor asociado al sensor nuevo.
- 3.18. Línea 133: Corresponde a la frecuencia con la que se repite el código, no deber ser menor a 60 segundos, ya que podría generar ruido entre los sensores lo que provocaría lecturas erróneas o fallas en el código.
- 3.19. Línea 143-150: Finalización del código y cierre de procesos.