



Evaluación termodinámica de un invernadero mediante el uso de dinámica de fluidos computacional*

Thermodynamic evaluation of a greenhouse using computational fluid dynamics

Bernal Steven Valverde-Delgado¹, Stephanie Quirós Campos²

* Recepción: 18 de febrero, 2025. Aceptación: 4 de agosto, 2025. Este trabajo formó parte de la tesis *Evaluación térmica de un invernadero no automatizado ubicado en la zona de Guápiles mediante el uso de dinámica de fluidos computacional*, desarrollada en conjunto con el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

¹ Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería de Biosistemas. San José, Costa Rica. bsteven.vd@gmail.com (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0009-0004-4674-1354>).

² Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Unidad Agrícola Central. San José, Costa Rica. mquiros@inta.go.cr (<https://orcid.org/0000-0003-4146-914X>).

Resumen

Introducción. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una técnica para simular el comportamiento de parámetros termodinámicos. **Objetivo.** Evaluar la termodinámica de un invernadero mediante CFD para proponer mejoras en la producción de lechuga. **Materiales y métodos.** La investigación fue ejecutada entre octubre de 2022 y febrero de 2023 en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. Se recopiló el rendimiento de tres ciclos de lechuga. Se desarrolló un modelo mecánico 3D del invernadero. Se generó una malla de 482 664 elementos con refinamiento en el interior. El análisis se realizó bajo flujo estacionario, utilizando la ecuación de Navier-Stokes con modelo de turbulencia k-ε y transporte de especies con interacciones térmicas mediante la ecuación de energía. Se modelaron materiales fluidos (aire y mezcla aire-vapor), sólidos (suelo y polietileno) y el cultivo como medio poroso. La evapotranspiración se estimó empleando datos meteorológicos y coeficientes de cultivo. Las condiciones de frontera incluyeron entrada de velocidad variable, paredes a temperatura constante y superficies porosas calibradas con datos bibliográficos. El modelo fue validado mediante MAE y RMSE, con errores inferiores al 10 %, y se propusieron mejoras pasivas y estructurales para optimizar el microclima interno del invernadero. **Resultados.** En el día, la temperatura y la humedad relativa en el invernadero superaron los 30 °C y el 65 %, respectivamente, mientras que durante la noche descendieron a 18 °C y cerca del 90 %. La temperatura presentó variaciones significativas en el eje vertical, pero se mantuvo más homogénea longitudinalmente, mientras que la humedad relativa mostró mayor variabilidad en ambas direcciones. **Conclusiones.** La modelación permitió visualizar el comportamiento del invernadero; se propuso aumentar las dimensiones de la ventana cenital de 11 m² a 20 m², la instalación de dos recirculadores de aire y una sombra móvil con transmisibilidad de luz del 50 %.

Palabras clave: equilibrio dinámico, producción de invernadero, modelación de cultivos, análisis térmico.



Abstract

Introduction. Computational fluid dynamics (CFD) is a technique for simulating the behavior of thermodynamic parameters. **Objective.** To evaluate the thermodynamics of a greenhouse using CFD in order to propose improvements in lettuce production. **Materials and methods.** The research was conducted between October 2022 and February 2023 at Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. The yield of three lettuce cycles was collected. A 3D mechanical model of the greenhouse was developed. A mesh of 482,664 elements was generated with refinement in the interior. The analysis was performed under steady-state flow, using the Navier-Stokes equation with the k- ϵ turbulence model and species transport with thermal interactions using the energy equation. Fluid materials (air and air-vapor mixture), solids (soil and polyethylene), and the crop as a porous medium were modeled. Evapotranspiration was estimated using meteorological data and crop coefficients. Boundary conditions included variable velocity input, constant temperature walls, and porous surfaces calibrated with bibliographic data. The model was validated using MAE and RMSE, with errors below 10 %, and passive and structural improvements were proposed to optimize the internal microclimate of the greenhouse. **Results.** During the day, the average temperature and relative humidity in the greenhouse exceeded 30 °C and 65 %, respectively, while during the night they decreased to 18 °C and close to 90 %. Temperature showed significant variations in the vertical axis, but remained more homogeneous longitudinally, while relative humidity exhibited greater variability in both directions. **Conclusions.** The modeling allowed visualization of the greenhouse behavior; it was proposed to increase the dimensions of the zenith window from 11 m² to 20 m², install two air recirculators, and incorporate a mobile shade with 50 % light transmissibility.

Keywords: dynamic equilibrium, greenhouse production, crop modeling, thermal analysis.

Introducción

El comportamiento termodinámico dentro de un invernadero depende tanto del diseño estructural como de variables ambientales internas y externas, como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento (Vivekanandan et al., 2021). La ventilación puede ser natural, por medio de corrientes de aire, o forzada a través de sistemas mecánicos como ventiladores (Norton et al., 2007). Antes de realizar inversiones en infraestructura, es posible utilizar herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), que permite simular con alta precisión distintos escenarios climáticos y evaluar la eficiencia de los sistemas de ventilación (Cemek et al., 2017). La modelación de invernaderos mediante CFD ha evolucionado hacia tecnologías tridimensionales que optimizan la distribución de temperatura, humedad y velocidad del viento, comparando el desempeño de sistemas de ventilación natural y forzada (Li et al., 2014; Majdoubi et al., 2009).

El CFD se utiliza para calcular numéricamente los flujos de aire, así como su comportamiento, composición y características termodinámicas. Su base matemática principal es la ecuación de Navier-Stokes, una ecuación diferencial parcial no lineal con la cual es posible obtener soluciones numéricas precisas de las variables ambientales, manteniendo constantes las condiciones externas (Yeo et al., 2022). Esta ecuación integra los principios de convección y difusión de fluidos, e incluye las ecuaciones de conservación de momento, energía y masa para describir el transporte de un fluido compresible en un campo tridimensional. La aplicación de estos modelos permite analizar y predecir con alta precisión la distribución de temperatura dentro del invernadero.

Para que las simulaciones numéricas en la modelación de invernaderos sean precisas, es fundamental seleccionar adecuadamente el dominio computacional y las características de la malla, ya que estos factores influyen de forma directa en los resultados obtenidos (He et al., 2018). Se realizan pruebas de independencia de malla para evaluar el rendimiento del modelo en función del número de nodos y elementos, considerando además

aspectos como la ortogonalidad, la relación de aspecto y la oblicuidad, que afectan la estabilidad y precisión del sistema (ANSYS Inc., 2013; Qi et al., 2022). En el análisis se integran modelos matemáticos que representan fenómenos físicos clave, como la turbulencia, la flotabilidad y la radiación. La correcta selección y configuración de estos modelos permite simular con mayor fidelidad el comportamiento termodinámico dentro del invernadero, optimizando su diseño y operación.

En la modelación de la turbulencia, comúnmente se utiliza el modelo *k-ε Realizable*; sin embargo, en condiciones más complejas o con presencia de obstáculos, se prefiere el modelo *RNG k-ε* debido a su mayor precisión bajo flujos turbulentos. El modelo *SST k-ω* también resulta útil cuando se requiere mayor exactitud en el cálculo de la energía cinética turbulenta (Chalill et al., 2021; Naranjani et al., 2022; Partheniotis et al., 2022; Villagrán et al., 2021). Para representar la flotabilidad, el modelo de Boussinesq es ampliamente empleado, pues simplifica los cálculos al considerar la densidad del aire como constante, siendo eficiente en flujos de convección natural (Kim et al., 2008). En cuanto a la simulación de la radiación, se aplican modelos como el de ordenadas discretas (DO), ideal para estructuras translúcidas como techos y paredes de invernadero (Kim et al., 2008; Villagrán et al., 2021). Asimismo, se utiliza el modelo de carga solar, que combina el trazado de rayos con el modelo *Superficie a Superficie* (S2S), lo cual permite estimar con precisión la energía interna dispersada (Chalill et al., 2021).

En la simulación CFD del comportamiento termodinámico en invernaderos, es fundamental considerar el efecto del cultivo sobre el flujo de aire. Una estrategia común es modelarlo como un sólido poroso de geometría regular, lo que permite representar la resistencia aerodinámica y la consecuente pérdida de presión (Chalill et al., 2021). Este fenómeno se describe por medio de la ecuación de Darcy-Forchheimer, que incluye tanto la pérdida viscosa como la pérdida de energía interna del fluido (Kim et al., 2021; Teitel et al., 2022). También se debe considerar el calor sensible generado por la evapotranspiración y la respiración celular del cultivo, ya que influye directamente en el microclima interno (Kim et al., 2021). Además, elementos como las mallas antiáfidos pueden modelarse como medios porosos de bajo espesor (menor que 0,05 m) (Teitel et al., 2022).

El objetivo de este estudio fue evaluar la termodinámica de un invernadero mediante CFD para proponer mejoras en la producción de lechuga.

Materiales y métodos

Descripción de la zona de estudio e invernadero

El invernadero se ubicó a 236 m s. n. m. en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Guápiles, Pococí, Limón, Costa Rica. Las coordenadas del sitio fueron 10,216527 N, -83,772274 O. El perfil asimétrico alcanzó una altura de 5,85 m hasta la parte baja del cenital y de 6,50 m hasta la parte alta. La apertura cenital fue de 0,55 m de ancho por 20,00 m de longitud (Figura 1). Las paredes laterales fueron construidas con malla antiáfidos y el techo con plástico para cubierta de invernadero de polietileno de alta densidad.

Cultivo evaluado

Se evaluaron tres ciclos de cultivo de lechuga de distintas variedades (Sargasso, Bergam Green), sembradas en 12 camas con dimensiones de 1 m de ancho, 7 m de largo y 0,30 m de altura. La distancia entre camas fue de aproximadamente 0,50 m. El marco de plantación fue tres hileras por cama con una distancia de 0,20 m entre plantas. La cantidad de plantas por cama rondó entre 60 y 66, para un total de 756 plantas. El primer ciclo de cultivo se evaluó del 6 de octubre al 3 de noviembre de 2022; el segundo ciclo del 17 de noviembre al 15 de diciembre de 2022; y el tercer ciclo del 13 de enero al 13 de febrero de 2023.

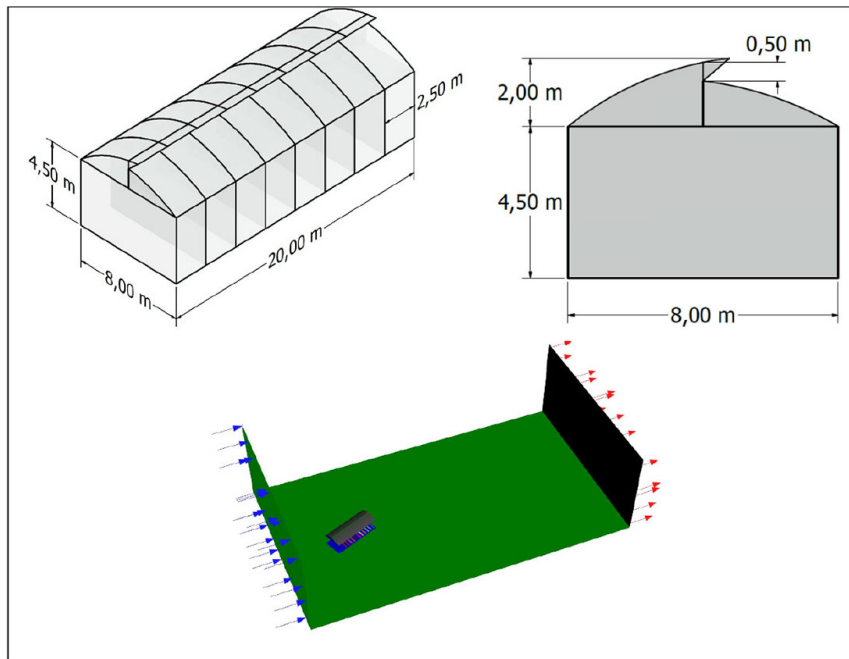


Figura 1. Dimensiones y condiciones de frontera del modelo CFD del invernadero en estudio ubicado en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 1. Dimensions and CFD model boundary conditions of the greenhouse under study located at Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Registro de variables climáticas

Para obtener los datos climáticos, se utilizó una estación meteorológica a nivel externo con rangos de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,30\text{ }^{\circ}\text{C}$), humedad de 1 a 100 % ($\pm 2\text{ }%$), velocidad del viento de 0 a 89 m/s ($\pm 0,90\text{ m/s}$), dirección del viento de 1 a 360° ($\pm 3^{\circ}$) y radiación de 0 a 1800 W/m^2 (5 % de la escala total). Para las condiciones internas, se instalaron doce registradores con recopilación automática de datos a tres alturas (inferior: 1,50 m; media: 3,00 m; superior: 4,50 m), situados en cuatro cuadrantes horizontales equidistantes (C1, C2, C3 y C4) (Figura 2) dentro del invernadero durante siete meses, desde agosto de 2022 hasta febrero de 2023.

Los registradores presentaron un rango de trabajo de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de humedad relativa de 0 a 100 % ($\pm 2,50\text{ }%$). Esto permitió el análisis de la temperatura y la humedad relativa en distintos planos a nivel vertical y horizontal dentro del invernadero. Además, se instaló un anemómetro con un rango de medición de velocidad de 0 a 76 m/s ($\pm 1,1\text{ m/s}$) y de dirección de 0 a 355° ($\pm 7^{\circ}$), ubicado dentro del invernadero a una altura de 3 m. Los datos dentro y fuera del invernadero se recolectaron cada 15 min.

Análisis de datos climáticos

Se realizó un análisis de varianza de dos factores mixtos con mediciones repetidas en el tiempo, seguido de una prueba *post-hoc* de Bonferroni. Se determinaron diferencias significativas entre los valores registrados de temperatura y humedad relativa en cada ciclo de lechuga, a distintas alturas y entre cuadrantes horizontales (Cuadro 1). Se plantearon un total de seis escenarios basados en la temperatura, donde se elaboraron bases de datos en cada

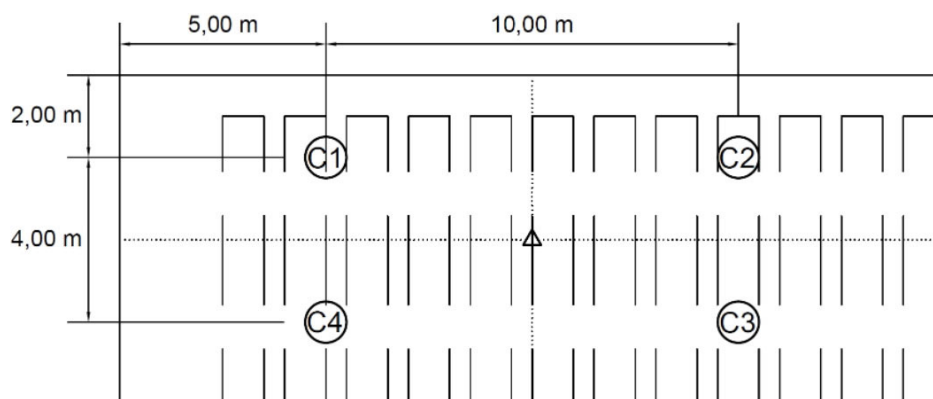


Figura 2. Distribución de sensores en el interior del invernadero. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Simbología: ○ → Varas de bambú con sensores de temperatura y humedad relativa. Δ → Vara de bambú con sensor de velocidad y dirección del viento. C → Cuadrante.

Figure 2. Sensor distribution inside the greenhouse. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Symbols: ○ → Bamboo poles with temperature and relative humidity sensors. Δ → Bamboo pole with wind speed and wind direction sensor. C → Quadrant. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

Cuadro 1. Datos de entrada para el modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) desarrollado para el invernadero ubicado en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Table 1. Input data for the computational fluid dynamics (CFD) model developed for the greenhouse located at Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

	Casos	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (rumbo, ° azimut)	Radiación solar (W/m ²)
Intervalo diurno	Ia	30,1	67	0,9	ESE, 112,5	913
	IIIa	30,2	70	0	ESE, 112,5	1004
	IVa	25,1	77	0	S, 180	339
Intervalo nocturno	IIb	18,5	92	0	SSE, 157,5	0
	IIIb	21,5	93	0	W, 270	0
	IVb	19,1	91	0	SE, 135	0

ESE: Este sureste. **S:** Sur. **SSE:** Sur sureste. **W:** Oeste. **SE:** Sureste. / **ESE:** East southeast. **S:** South. **SSE:** South southeast. **W:** West. **SE:** Southeast.

ciclo con las siguientes características: a) horas con mayor frecuencia de temperaturas máximas registradas en cada altura durante el intervalo diurno (6:00 a 17:45) y b) horas con mayor frecuencia de temperaturas mínimas registradas en cada altura durante el intervalo nocturno (18:00 a 5:45). La variable viento se analizó mediante estadística descriptiva para obtener la media de los valores registrados por ciclo de cultivo de lechuga.

Modelo mecánico y discretización

Se elaboró un modelo mecánico del invernadero en 3D y se tomaron como referencia las especificaciones técnicas. Las camas del cultivo se representaron como paralelepípedos rectangulares. El volumen de control se definió como un paralelepípedo rectangular cuyas dimensiones dependen de la altura máxima del invernadero (H), y su orientación depende de la dirección del viento (Kim, Lee & Kwon, 2017; Kim, Hong et al., 2017; Li et al., 2020; Yeo et al., 2022).

Los lados perpendiculares a la dirección del viento y hacia arriba del volumen se ampliaron cinco veces la altura máxima del invernadero (5H); hacia el lado a barlovento se agrandaron tres veces (3H), y hacia el lado a sotavento se extendieron quince veces (15H). En el proceso de discretización se elaboró una malla con un total de 482 664 elementos. A esta malla se le aplicaron tratamientos de “dimensionamiento localizado” (*local sizing*) en las zonas de mayor importancia para los resultados (interior del invernadero), de manera que se utilizó un tamaño de elemento menor para aumentar la precisión.

Características del modelo y condiciones de frontera

El modelo se analizó en estado de flujo estacionario, ya que no se disponía de los datos necesarios para realizar los cálculos dependientes del tiempo para un análisis de flujo transitorio. El modelo desarrollado utilizó la ecuación de Navier-Stokes, basada en la presión como algoritmo de solución. Se consideró que las diferencias de densidad eran despreciables; por lo tanto, el método resolvió las ecuaciones integrales de gobierno (conservación de masa, momento y energía, entre otros parámetros) para la estimación de los campos de velocidad, presión y temperatura, como se muestra en la ecuación 1 (ANSYS Inc., 2013).

$$\frac{\delta\rho\phi}{\delta t} + \nabla(\rho\phi\vec{v}) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S \quad (1)$$

Donde ϕ es la variable de concentración, ρ es la densidad del aire, t es el tiempo, \vec{v} es el vector de velocidad, Γ es el coeficiente de difusión y S es el término fuente (Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana, 2019). Se utilizaron los submodelos de viscosidad - turbulencia $k-\varepsilon$ (k -*epsilon*) estándar con un tratamiento de pared mejorado, y el de transporte de especies (ANSYS Inc., 2013). Estos modelos se complementaron mediante la ecuación de energía, para calcular los cambios de energía como resultado de la interacción entre las sustancias y especies, y su interacción con el ambiente (superficies, medios porosos) y las condiciones externas (radiación).

El modelo incluyó tres materiales distintos: 1) fluido, compuesto por el aire, el oxígeno y el nitrógeno; 2) mezcla, que se habilita al usar el modelo de transporte de especies, las cuales son el aire y el vapor de agua; y 3) sólido, donde se incluyeron el polietileno (que conforma el techo del invernadero) y el suelo. Las propiedades físicas y térmicas de los materiales utilizados (aire, suelo y polietileno) corresponden a estudios previos desarrollados por Villagrán & Bojacá (2019). Estas propiedades se consideraron constantes tanto durante el tiempo de registro de los datos como durante las simulaciones de CFD, dado que se simuló en estado estacionario.

Las zonas de celdas correspondieron a los tres volúmenes o regiones definidas en el modelo mecánico, como el volumen de control, el invernadero y el cultivo. Los tres volúmenes se conformaron por fluido y se configuraron para el transporte de este, separados por paredes o interfases según correspondía. La región de cultivo, a diferencia de las otras dos, presentó una restricción al flujo de aire a través de las plantas; para simular este fenómeno, la región se modeló como un medio poroso. Las propiedades asignadas al medio poroso, requeridas por el programa para que este se asemeje al fenómeno producido por el cultivo, se tomaron de una investigación realizada por Fang et al. (2020), de acuerdo con las características de la malla presente en el invernadero.

Para la estimación de la evapotranspiración de referencia (E_t0) se utilizó el *software* CropWat de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés). Se recopiló datos de la estación meteorológica ubicada en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes y se consideró el coeficiente de cultivo (k_c), según la etapa fenológica del cultivo de la lechuga, para determinar la evapotranspiración de cultivo (E_{tc}) (FAO, 2006; Garita Cerdas, 2019). El cálculo del flujo másico de vapor de agua del medio poroso se realizó mediante el producto de estos parámetros, la cantidad de plantas y la densidad del aire, dividido entre el volumen aproximado que ocupa el follaje del cultivo.

El modelo desarrollado incluyó una frontera como entrada de velocidad. El aire de ingreso varió en velocidad y dirección en cada caso, así como en temperatura y humedad relativa. Las dos fronteras perpendiculares al flujo de aire se establecieron como fronteras de simetría. Las fronteras superior e inferior, así como el techo del invernadero, se definieron como paredes a temperatura constante. Las paredes y el cenital se configuraron como “salto poroso”, donde el calibre declarado de la malla fue de 50 mesh, por lo que se contrastó la información con datos de la literatura para la adecuada configuración del modelo (López et al., 2016; López-Martínez et al., 2020; Miguel et al., 1997; Molina-Aiz et al., 2010; Teitel, 2001). El suelo se consideró como pared con un flujo de calor constante. El flujo de calor en el suelo del invernadero se calculó con las ecuaciones 2 y 3 (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2008):

$$H_{sc} = R_I(\tau_{pe} - \alpha_{plantas} \cdot f_c) \quad (2)$$

$$H_{sd} = R_I(\tau_{pe} - \alpha_{suelo} \cdot f_d) \quad (3)$$

La ecuación 2 corresponde al cálculo del flujo de calor en el suelo cultivado, donde R_I es la radiación solar incidente, τ_{pe} es la transmisividad del polietileno, $\alpha_{plantas}$ es el coeficiente de absorción de las plantas para la radiación solar y f_c es la fracción de suelo cultivado. El coeficiente $\alpha_{plantas}$ está relacionado con el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), cuyos valores para el cultivo de lechuga entre las 0 y 4 semanas de desarrollo se encuentran entre 0 y 5 aproximadamente (IDAE, 2008; Sandmann et al., 2013; Schneider et al., 2018). El valor de LAI se estimó según la etapa fenológica del cultivo correspondiente a la fecha y hora de los datos de entrada utilizados para realizar la simulación.

El flujo de calor en el suelo descubierto se determinó mediante la ecuación 3 donde, a diferencia de la ecuación 2, el α_{suelo} es el coeficiente de absorción del suelo para la radiación solar. El valor de albedo depende del tipo de superficie de suelo, el cual se consideró como una mezcla de arenas y arcilla seca, para un valor de 0,17 (IDAE, 2008). El coeficiente de transmisión por radiación del polietileno es de 0,89.

Proceso de validación del modelo

El error absoluto medio (MAE) se calculó según la ecuación 4, y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), mediante la ecuación 5, como métodos para medir el rendimiento del modelo. Para esto, se compararon las variables monitoreadas y los datos obtenidos del modelo CFD. Las fórmulas utilizadas se muestran a continuación (Seo et al., 2021).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{reg} - D_{cfd}| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{reg} - D_{cfd})^2}{n}} \quad (5)$$

Donde n corresponde al tamaño de la muestra, D_{reg} es el dato registrado en campo y D_{cfd} es el dato obtenido mediante simulación. Estas ecuaciones se utilizaron para medir la precisión predictiva del modelo, de manera que, entre más cercano a cero (0) esté el valor de error, más preciso es el modelo desarrollado. En esta investigación se consideró aceptable una diferencia entre las mediciones de campo y los datos de simulación inferior al 10 % (Bournet & Rojano, 2022). Las fechas de los casos validados correspondieron a los casos del intervalo nocturno IIb (10-12-22, 05:30), IIIb (08-10-22, 05:30) y IVb (23-01-23, 05:45), así como al caso IIIa (19-10-22, 11:00) del intervalo diurno. Posterior a la validación, se seleccionaron los casos IIb, IVb y IIIa para su análisis.

Propuestas de mejora

Se realizaron propuestas de mejora para el invernadero en estudio, orientadas a optimizar su funcionamiento para el cultivo y la producción de lechuga. Estas funcionarían como medidas correctivas, dado que la estructura ya está construida y la instalación de equipos de automatización, además de requerir una inversión elevada, podría comprometer al invernadero estructuralmente. Las propuestas se formularon con el objetivo de regular y homogeneizar las condiciones críticas identificadas en los análisis previos en el interior del invernadero, en términos de temperatura y humedad relativa, y considerando las condiciones externas que afectan la dinámica interna.

Resultados

Comportamiento de las variables climáticas registradas

Los seis escenarios adversos basados en la temperatura (Ia, IIIa, IVa, IIb, IIIb y IVb) se muestran en el Cuadro 1. El análisis se realizó únicamente por la influencia de la temperatura y la humedad relativa en la dinámica del invernadero. No se analizó la influencia de la velocidad del viento debido a que su valor promedio fue de 0,5 m/s, mientras que la velocidad modal fue de 0 m/s.

A. Temperatura según altura y cuadrante

La temperatura promedio a nivel vertical mostró diferencias significativas durante el intervalo diurno ($p < 0,05$). Las mayores temperaturas se registraron en la zona superior del invernadero a 4,50 m de altura (>30 °C). Las temperaturas en el intervalo diurno presentaron una alta variabilidad, con una desviación estándar de 4,81 °C (ciclo 1), 5,04 °C (ciclo 2) y 5,11 °C (ciclo 3) (Figura 3A), mientras que para el intervalo nocturno la desviación estándar fue de 1,23 °C (ciclo 1), 1,44 °C (ciclo 2) y 1,42 °C (ciclo 3) (Figura 3B).

La temperatura promedio durante el intervalo diurno mostró variaciones entre los cuadrantes, pero no entre los ciclos de cultivo (Figura 4A). En contraste, durante el intervalo nocturno solo se observaron diferencias entre los ciclos de cultivo ($p < 0,05$) (Figura 4B). Las temperaturas registradas en el intervalo diurno presentaron una alta variabilidad, con una desviación estándar promedio de 4,99 °C entre los ciclos de cultivo, mientras que en el intervalo nocturno la desviación estándar promedio fue de 1,36 °C entre los ciclos de cultivo.

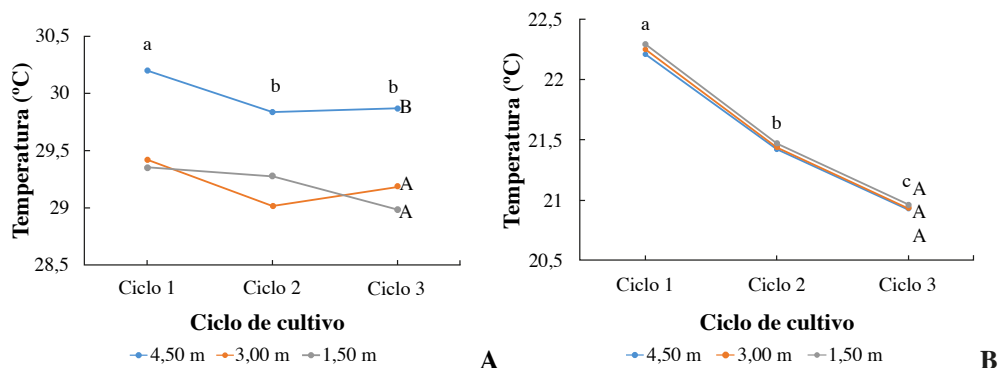


Figura 3. Análisis vertical de la temperatura en los tres ciclos productivos de lechuga. **A)** Intervalo diurno. **B)** Intervalo nocturno. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre alturas, y letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo.

Figure 3. Vertical temperature analysis in the three lettuce production cycles. **A)** Diurnal interval. **B)** Nocturnal interval. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Different uppercase letters indicate significant differences between heights, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles.

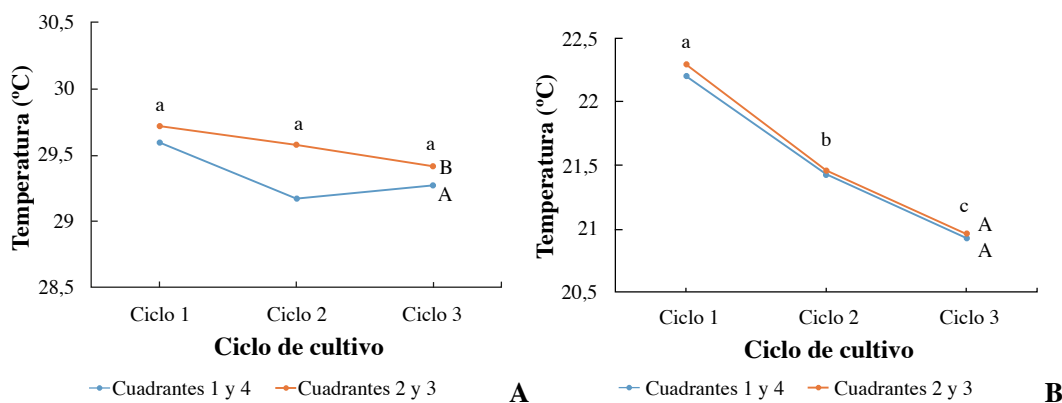


Figura 4. Análisis horizontal de la temperatura en los tres ciclos productivos de lechuga. **A)** Intervalo diurno. **B)** Intervalo nocturno. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre cuadrantes horizontales, y letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo.

Figure 4. Horizontal analysis of temperature across three lettuce production cycles. **A)** Daytime interval. **B)** Nighttime interval. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Different uppercase letters indicate significant differences between horizontal quadrants, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles.

B. Humedad relativa según altura y cuadrante

La humedad relativa presentó diferencias significativas por nivel de altura en el intervalo diurno, mientras que el comportamiento en los cuadrantes horizontales fue más homogéneo; solamente se registraron diferencias significativas entre ciclos de producción ($p < 0,05$). En el intervalo nocturno se observaron variaciones por nivel

de altura, entre cuadrantes horizontales y ciclos de cultivo. Los promedios de humedad relativa por altura se mantuvieron entre 65 y 73 % durante el intervalo diurno (Figura 5A), mientras que en el intervalo nocturno se obtuvieron valores entre 85 y 100 % (Figura 5B).

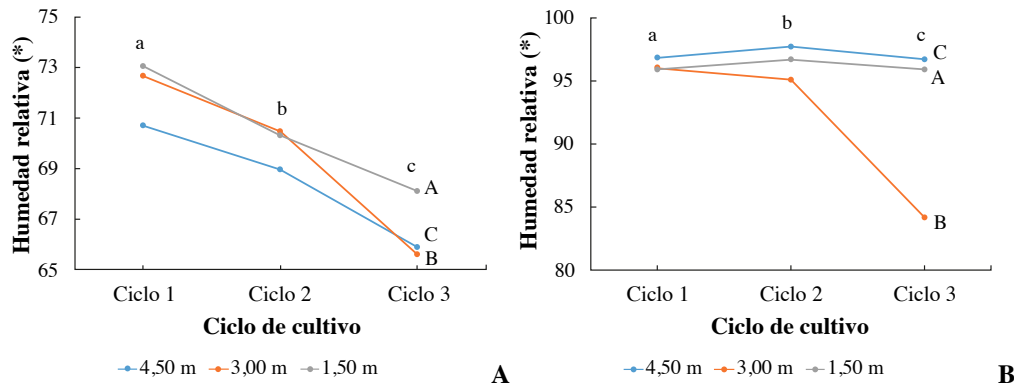


Figura 5. Análisis vertical de la humedad relativa en los tres ciclos productivos de lechuga. **A)** Intervalo diurno. **B)** Intervalo nocturno. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre alturas, y letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo.

Figure 5. Vertical analysis of relative humidity across three lettuce production cycles. **A)** Daytime interval. **B)** Nighttime interval. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Different uppercase letters indicate significant differences between heights, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles.

Los resultados de la humedad relativa en los cuadrantes horizontales no presentaron diferencias significativas en el intervalo diurno (Figura 6A), pero sí entre ciclos de cultivo. En el análisis del intervalo nocturno, existieron

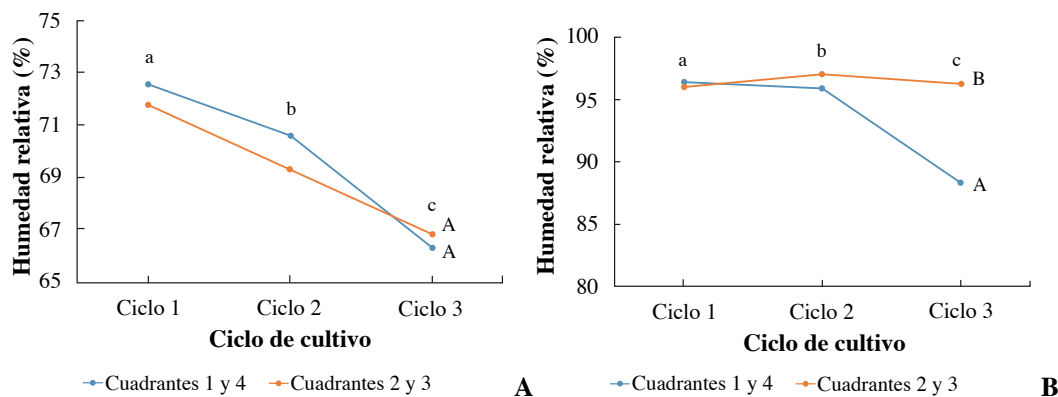


Figura 6. Análisis horizontal de la humedad relativa en los tres ciclos productivos de lechuga. **A)** Intervalo diurno. **B)** Intervalo nocturno. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre cuadrantes horizontales, y letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo.

Figure 6. Horizontal analysis of relative humidity in the three lettuce production cycles. **A)** Daytime interval. **B)** Nighttime interval. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Different uppercase letters indicate significant differences between horizontal quadrants, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles.

diferencias significativas tanto entre cuadrantes horizontales como entre ciclos de producción (Figura 6B). Además, se observó una interacción entre los cuadrantes horizontales y los ciclos productivos para ambos intervalos.

C. Modelación climática del invernadero y validación del modelo

El modelo fue validado en cuatro de los seis casos de estudio planteados: tres correspondientes al intervalo nocturno (IIb, IIIb y IVb) y uno al intervalo diurno (IIIa). Los casos Ia y VIa no se validaron debido a que los valores de error superaron el 10 %. El análisis de los contornos obtenidos mediante la simulación, tanto en el intervalo diurno como nocturno, demostró que las condiciones climáticas internas para la producción de cultivos en el invernadero fueron críticas.

Los contornos de los casos IIb, IIIb y IVb mostraron que la temperatura y la humedad relativa fueron uniformes dentro del invernadero en los casos de temperaturas más bajas, con ligeras variaciones atribuibles al efecto de la evapotranspiración del cultivo y a la inestabilidad en los cálculos. Las temperaturas promedio fueron de 18,50 °C, 21,50 °C y 19,10 °C, respectivamente, con humedades relativas promedio superiores al 90 % en los tres casos. Para efectos demostrativos, se incluye el caso IIb, cuyos porcentajes promedio de error fueron de 1,20 % para la temperatura y 6,32 % para la humedad relativa; es decir, el modelo representó de manera aceptable los fenómenos termodinámicos que ocurrían dentro del invernadero, por lo que se consideró en la validación (Figura 7).

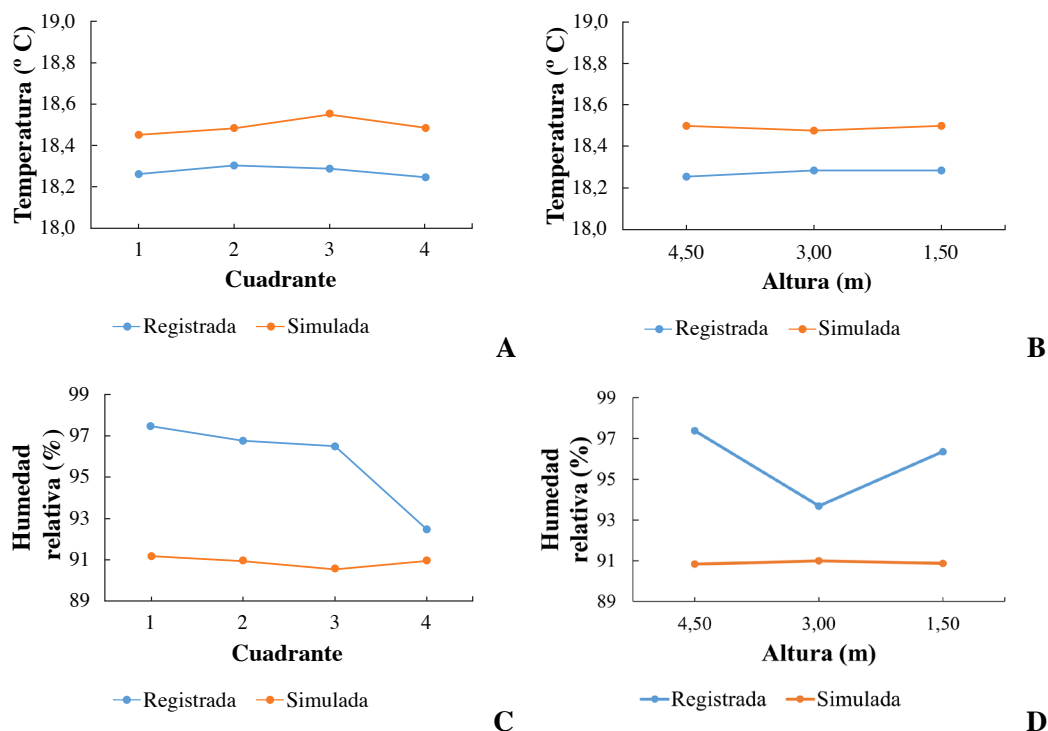


Figura 7. Comparación entre los datos registrados y los simulados para el caso IIb según cuadrante (1, 2, 3 y 4) y altura (1,50 m, 3,00 m y 4,50 m). **A)** Temperatura por cuadrante. **B)** Temperatura por altura. **C)** Humedad relativa por cuadrante. **D)** Humedad relativa por altura. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 7. Comparison between recorded and simulated data for case IIb by quadrant (1, 2, 3, and 4) and height (1,50 m, 3,00 m, and 4,50 m). **A)** Temperature by quadrant. **B)** Temperature by height. **C)** Relative humidity by quadrant. **D)** Relative humidity by height. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

D. Análisis de la producción de lechuga

En el caso de la lechuga cultivada durante la realización de este estudio, se encontró que las mortalidades aproximadas fueron de un $16,00 \pm 7,61$ % en el primer ciclo, $3,04 \pm 1,58$ % en el segundo, y $2,25 \pm 0,79$ % en el tercero. La disminución en la mortalidad en el segundo y tercer ciclo responde a la aplicación de enmiendas de calcio y soluciones nutritivas, así como un cambio en la variedad de lechuga utilizada por una más resistente a condiciones adversas. Sin embargo, los porcentajes siguen siendo altos para una producción en invernadero (Wang et al., 2023).

Casos validados: comportamiento de la temperatura y la humedad relativa

La temperatura alcanzó valores cercanos a los 40 °C a una altura de 1,5 m (altura media) durante el día (Figura 8A). Estas condiciones críticas de temperatura afectan negativamente el desarrollo del cultivo y provocan un

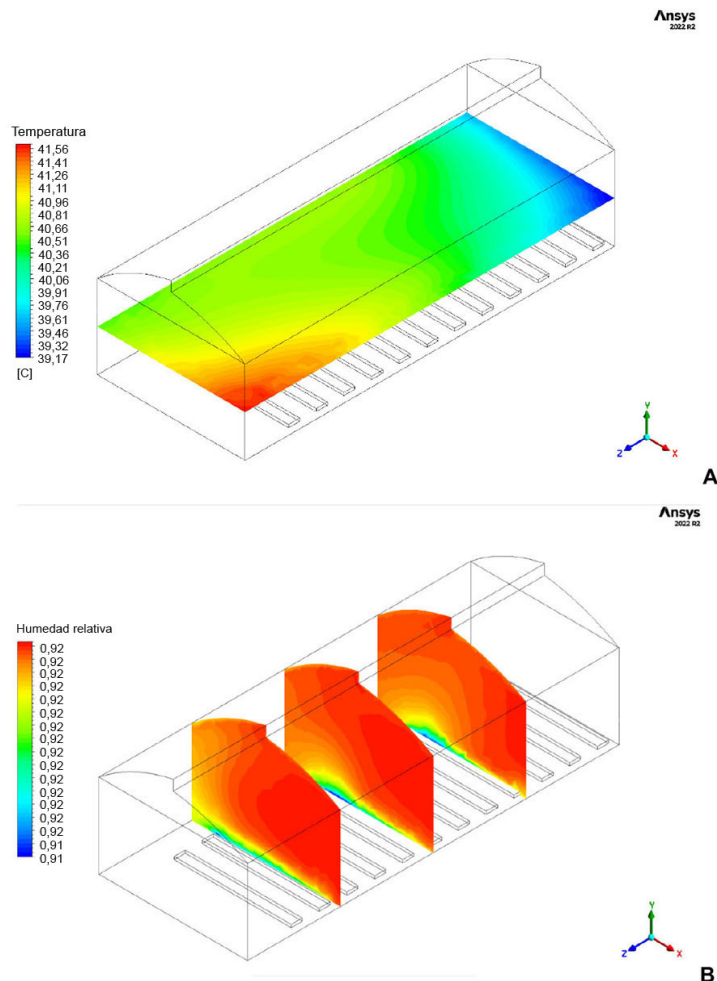


Figura 8. A) Contorno horizontal de temperatura (°C) para el caso IIIa. **B)** Contorno transversal de humedad relativa (%) para el caso IIb. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 8. A) Horizontal contour of temperature (°C) for case IIIa. B) Transverse contour of relative humidity (%) for case IIb. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

aumento en el consumo de los sistemas de riego. Por la noche, la humedad relativa presentó valores superiores al 90 % (Figura 8B), lo cual podría causar efectos adversos sobre el cultivo, ya que limita su actividad metabólica, dificulta la polinización y crea un ambiente idóneo para la proliferación de plagas y enfermedades.

Casos validados: vectores de velocidad

La simulación indicó que la velocidad del viento fue insuficiente para su propia ventilación pasiva. Únicamente en el caso IIIa superó el 1 m/s en la pared sur del invernadero, mientras que en el resto del espacio las velocidades se mantuvieron por debajo de 0,50 m/s (Figura 9). Sin embargo, dado que los datos de entrada para la magnitud de la velocidad del viento fueron de 0,0 m/s, se determinó que este comportamiento en los vectores de velocidad ocurrió por el efecto de la interacción entre las variables termodinámicas y la forma en que estas fueron representadas en el modelo, además de inestabilidades en el cálculo.

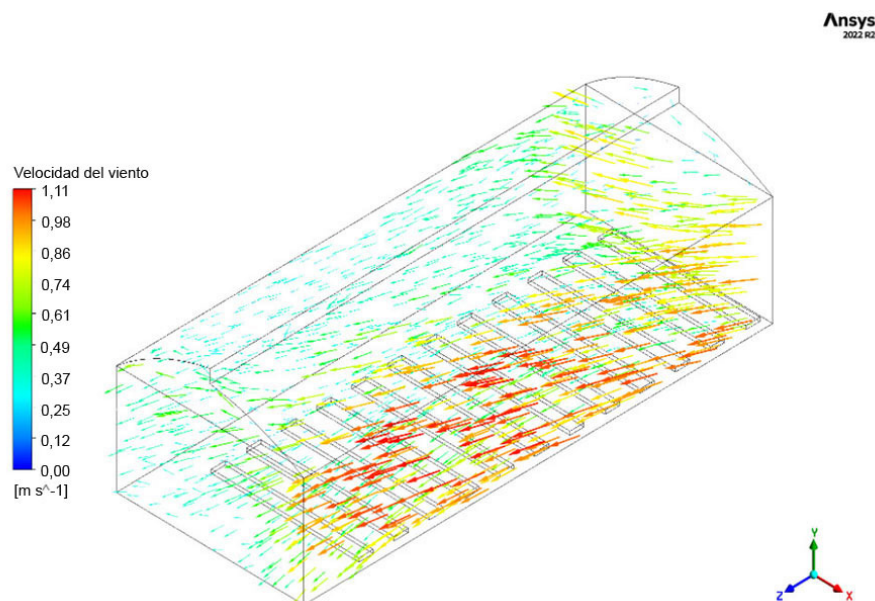


Figura 9. Vector de velocidad analizado del caso IIIa. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 9. Velocity vector analysis of case IIIa. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

En el caso IIb, las velocidades no superaron los 0,01 m/s (Figura 10). Los valores más altos y las corrientes observadas fueron generadas, al igual que en el caso anterior, por la termodinámica del invernadero e inestabilidades en el cálculo. Además, el análisis de estos vectores para el intervalo nocturno evidenció que la ventilación natural fue insuficiente, lo cual deriva en otros problemas para el correcto funcionamiento del invernadero.

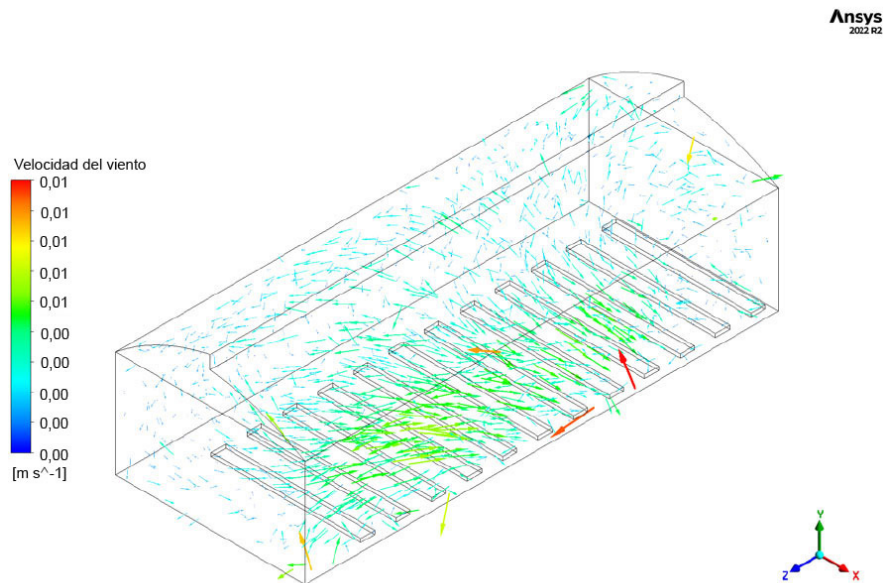


Figura 10. Vectores de velocidad del viento [m s^{-1}] analizados del caso IIb. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 10. Analyzed wind velocity vectors [m s^{-1}] of case IIb. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center, Limón, Costa Rica. 2023.

Discusión

La temperatura y la humedad relativa en el invernadero mostraron inestabilidad, con temperaturas cercanas a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, altos niveles de humedad al 90% y velocidades de viento inferiores a $0,05\text{ m/s}$. En estudios similares en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, se han registrado temperaturas de $24\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedades de $30\text{-}70\%$ (López-López & Benavides-León, 2014). Investigaciones efectuadas en Colombia han destacado la importancia de una ventilación eficiente, ya sea activa por medio del uso de ventiladores o pasiva mediante ventilación natural, para asegurar la renovación de aire en la estructura (Villagran et al., 2021; Villagrán & Bojacá, 2019; Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana et al., 2019).

El análisis de la temperatura mostró rangos óptimos para el cultivo de lechuga ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $26\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Ahmed et al., 2020; Amirahmadi et al., 2023) durante los tres ciclos de cultivo. No obstante, se cuantificó una alta variabilidad térmica, con una desviación estándar mínima de $4,81\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el intervalo diurno y de $1,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el nocturno. Las temperaturas máximas superaron el rango óptimo durante el día, especialmente cerca del mediodía. Esto podría desencadenar efectos negativos en la planta y el fruto debido al estrés abiótico, lo que reduce su calidad comercial (Khan et al., 2022). La humedad relativa se mantuvo en su mayoría cercana a los valores máximos recomendados para el cultivo; sin embargo, esta variable también presentó alta variabilidad.

Las condiciones de alta humedad persistieron por más de 12 horas, lo cual propició condiciones para el desarrollo de hongos y bacterias, que causaron enfermedades y afectaron la producción. La alta humedad relativa podría tener efectos adversos en el cultivo, ya que reduce la transpiración a través de los estomas y limita la actividad de la planta, la absorción de nutrientes y el crecimiento. Además, dificulta la polinización y aumenta la

probabilidad de enfermedades y plagas y, por ende, se disminuye la cantidad y calidad del producto (Amani et al., 2020; Ferrante & Mariani, 2018).

En relación con la velocidad del viento, los resultados de la simulación muestran que la magnitud de la velocidad fue de 0,33 m/s con dirección este-sureste, mientras que el dato registrado fue de 0 m/s. Cabe destacar que se identificó la necesidad de situar la estación meteorológica contigua al invernadero, ya que, en el modelo generado, la frontera de entrada de viento se ubicó a 20 m del invernadero y la estación meteorológica utilizada estuvo instalada a 500 m de distancia. Idealmente, el equipo de medición debe colocarse en las cercanías del invernadero para aumentar la precisión tanto de los datos de entrada como de los resultados de la simulación (Benni et al., 2016; Rojas Rishor, 2015).

El caso IIIa del intervalo diurno y los casos IIb, IIIb y IVb del intervalo nocturno se lograron validar, debido a que sus porcentajes de error promedio fueron inferiores al 10 %. Los contornos de los casos del intervalo nocturno mostraron que la temperatura y la humedad relativa fueron uniformes en el recinto para los casos de temperatura más bajas y presentaron apenas ligeras variaciones, derivadas del efecto de la evapotranspiración del cultivo y de la inestabilidad en los cálculos. Los contornos de los casos correspondientes al intervalo diurno exhibieron mayores variaciones en ambos parámetros.

Las diferencias entre los datos registrados y los modelados podrían reducirse mediante la inclusión de modelos de convección y la consideración de temperaturas variables en las superficies, ya que el uso de temperaturas constantes limita la distribución natural del calor (Baxevanou et al., 2018; Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana, 2019). Además, en los contornos horizontales se observa un patrón particular, con una concentración de altas temperaturas en la esquina suroeste del invernadero y bajas temperaturas en la esquina sureste (con una diferencia de 2,39 °C). Este comportamiento podría estar relacionado con fenómenos termodinámicos internos, como la evapotranspiración del cultivo o inestabilidades en el cálculo del equilibrio térmico.

La humedad relativa es una de las problemáticas más críticas del invernadero en estudio. Dado que el invernadero funciona con ventilación natural y las humedades relativas ambientales externas son bastante altas, el problema podría persistir a pesar de las mejoras propuestas. Para favorecer estas condiciones se podrían realizar algunas modificaciones y/o instalar equipos de control climático en el invernadero que beneficien la dinámica y regulen el comportamiento de la humedad relativa para crear un ambiente propicio para el crecimiento y la producción agrícola.

Las propuestas de mejora están orientadas a contrarrestar la problemática encontrada en el presente estudio. Como principal problema se identificó la velocidad del viento muy baja o nula (promedio de 0,05 m/s, modal de 0,00 m/s), ya que se encuentra por debajo de los niveles recomendados para una correcta ventilación. Además, las condiciones externas y la ventilación ineficiente generan una temperatura y una humedad relativa muy elevadas (superior a 35 °C y mayor que 90 %, hasta alcanzar niveles de saturación), valores que superan las condiciones óptimas para gran parte de los cultivos.

Para homogeneizar las condiciones internas y regular las altas temperaturas y humedades relativas en el interior del invernadero, se realizaron tres propuestas de mejora. La primera propuesta consistió en la modificación del cenital, ya que la apertura cenital tiene un área de 11 m², equivalente a un 7 % del área de suelo; sin embargo, para invernaderos de tipo tropical se recomienda una apertura de entre 12,50 y 20,00 % del área de suelo para maximizar la influencia de la ventilación natural. Dadas las condiciones críticas de la zona de estudio, se recomendó utilizar el valor máximo, lo que daría como resultado un cenital con un área de 32 m² (20,00 m de largo por 1,60 m de altura).

Como segunda propuesta, se recomendó la instalación de dos ventiladores recirculadores internos con una capacidad de 130 m³/min cada uno, ubicados en la parte superior del invernadero, para homogeneizar las condiciones internas y reducir gradientes de temperatura y humedad relativa. Por último, se propuso la instalación de una malla de sombreo con el fin de restringir la radiación solar y la intensidad de la luz. Una disminución de entre 30 y 50 % en la intensidad de la luz podría ocasionar una reducción en la temperatura de hasta 3 °C.

Conclusiones

La temperatura mostró una alta variabilidad entre las alturas analizadas a lo largo de los tres ciclos de cultivo de lechuga, mas no en el análisis de cuadrantes horizontales, donde presentó un comportamiento más uniforme. La humedad relativa exhibió una alta variabilidad tanto entre las alturas como entre los cuadrantes horizontales. El análisis demostró que la estructura de invernadero durante el periodo de evaluación generó condiciones no aptas para la producción de lechuga. Por tanto, se identificó la necesidad de implementar ajustes en el diseño y el manejo del invernadero, así como la instalación de equipos para regular, controlar y/u homogeneizar las condiciones ambientales con el fin de optimizar su funcionamiento.

Referencias

- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: a review. *South African Journal of Botany*, *130*, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>
- Amani, M., Ferooshani, S., Sultan, M., & Bahrami, M. (2020). Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. *Applied Thermal Engineering*, *181*, Artículo 115979. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115979>
- Amirahmadi, E., Ghorbani, M., Moudry, J., Konvalina, P., & Kopecký, M. (2023). Impacts of environmental factors and nutrients management on tomato grown under controlled and open field conditions. *Agronomy*, *13*(3), Artículo 916. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030916>
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide* (Vol. 15). https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, *149*, 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>
- Benni, S., Tassinari, P., Bonora, F., Barbaresi, A., & Torreggiani, D. (2016). Efficacy of greenhouse natural ventilation: environmental monitoring and CFD simulations of a study case. *Energy and Buildings*, *125*, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.014>
- Bournet, P.-E., & Rojano, F. (2022). Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: research, applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *201*, Artículo 107277. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107277>
- Cemek, B., Atiş, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, *32*(1), 54–63. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.289354>
- Chalill, S. M., Chowdhury, S., & Karthikeyan, R. (2021). Prediction of key crop growth parameters in a commercial greenhouse using CFD simulation and experimental verification in a pilot study. *Agriculture*, *11*(7), Artículo 658. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070658>

- Fang, H., Li, K., Wu, G., Cheng, R., Zhang, Y., & Yang, Q. (2020). A CFD analysis on improving lettuce canopy airflow distribution in a plant factory considering the crop resistance and LEDs heat dissipation. *Biosystems Engineering*, 200, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.017>
- Ferrante, A., & Mariani, L. (2018). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: High and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae*, 4(3), Artículo 21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4030021>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Garita Cerdas, A. (2019). *Diseño de sistema de riego por goteo en ambientes protegidos para cultivo de hortalizas, en las zonas de Pacayas y Cipreses, Cartago* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/11286>
- He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2018). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10995_Agr07_AyEE_en_invernaderos_A2008_9e4c63f5.pdf
- Khan, A. H., Min, L., Ma, Y., Zeeshan, M., Jin, S., & Zhang, X. (2022). High-temperature stress in crops: male sterility, yield loss and potential remedy approaches. *Plant Biotechnology Journal*, 21(4), 680–697. <https://doi.org/10.1111/pbi.13946>
- Kim, R., Hong, S., Lee, I., & Kwon, K. (2017). Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 2: Application of the CFD model. *Biosystems Engineering*, 164, 257–280. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.011>
- Kim, R.-W., Kim, J.-G., Lee, I.-B., Yeo, U.-H., Lee, S.-Y., & Decano-Valentin, C. (2021). Development of three-dimensional visualisation technology of the aerodynamic environment in a greenhouse using CFD and VR technology, Part 1: Development of VR a database using CFD. *Biosystems Engineering*, 207, 33–58. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.017>
- Kim, R., Lee, I., & Kwon, K. (2017). Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model. *Biosystems Engineering*, 164, 235–256. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008>
- Kim, K., Yoon, J.-Y., Kwon, H.-J., Han, J.-H., Son, J. E., Nam, S.-W., Giacomelli, G. A., & Lee, I.-B. (2008). 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering*, 100(2), 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.03.006>
- Li, H., Li, Y., Yue, X., Liu, X., Tian, S., & Li, T. (2020). Evaluation of airflow pattern and thermal behavior of the arched greenhouses with designed roof ventilation scenarios using CFD simulation. *PLoS ONE*, 15(9), Artículo e0239851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239851>
- Li, Y., Sun, G., & Wang, X. (2014). Temperature field-wind velocity field optimum control of greenhouse environment based on CFD model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014(1), Artículo 949128. <https://doi.org/10.1155/2014/949128>

- López, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Peña, A. (2016). Wind tunnel analysis of the airflow through insect-proof screens and comparison of their effect when installed in a mediterranean greenhouse. *Sensors*, *16*(5), Artículo 690. <https://doi.org/10.3390/s16050690>
- López-López, A. J., & Benavides-León, C. (2014). Respuesta térmica del invernadero de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, *25*(1), 121–132. <https://doi.org/10.15517/am.v25i1.14212>
- López-Martínez, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Espinoza-Ramos, K. E. (2020). Models for characterising the aerodynamics of insect-proof screens from their geometric parameters. *Biosystems Engineering*, *192*, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.013>
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., & Bouirden, L. (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*(6–7), 1050–1062. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.01.002>
- Miguel, A. F., Van de Braak, N. J., & Bot, G. P. A. (1997). Analysis of the airflow characteristics of greenhouse screening materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *67*(2), 105–112. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0157>
- Molina-Aiz, F. D., Fatnassi, H., Boulard, T., Roy, J. C., & Valera, D. L. (2010). Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, *72*(2), 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.03.002>
- Naranjani, B., Najafianashrafi, Z., Pascual, C., Agulto, I., & Chuang, P.-Y. A. (2022). Computational analysis of the environment in an indoor vertical farming system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *186*, Artículo 122460. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122460>
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology*, *98*(12), 2386–2414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Partheniotis, G., Kalamaras, S. D., Martzopoulou, A. G., Firfiris, V. K., & Fragos, V. P. (2022). Turbulence models studying the airflow around a greenhouse based in a wind tunnel and under different conditions. *AgriEngineering*, *4*(1), 216–230. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010016>
- Qi, D., Li, S., Zhao, C., Xie, W., & Li, A. (2022). Structural optimization of multi-pipe earth to air heat exchanger in greenhouse. *Geothermics*, *98*, Artículo 102288. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102288>
- Rojas Rishor, A. (2015). *Análisis del comportamiento térmico de un invernadero construido en ladera, aplicando dinámica de fluidos computacional* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio del Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información (SIBDI). <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2016/02/tesis-adriana-rojas.pdf>
- Sandmann, M., Graefe, J., & Feller, C. (2013). Optical methods for the non-destructive estimation of leaf area index in kohlrabi and lettuce. *Scientia Horticulturae*, *156*, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.04.003>
- Schneider, J. R., Thiesen, L. A., Engroff, T. D., Holz, E., & Altissimo, B. S. (2018). Growth analysis of lettuce under different substrate compositions. *Advances in Horticultural Science*, *32*(2), 221–227. <https://doi.org/10.13128/ahs-21882>

- Seo, I.-H., Lee, H. J., Wi, S. H., Lee, S.-W., & Kim, S. K. (2021). Validation of an air temperature gradient using computational fluid dynamics in a semi-open type greenhouse and determination of kimchi cabbage physiological responses to temperature differences. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 62(5), 737–750. <https://doi.org/10.1007/s13580-021-00378-3>
- Teitel, M. (2001). The effect of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110(1), 13–25. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00280-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00280-5)
- Teitel, M., Ozer, S., & Mendelovich, V. (2022). Airflow temperature and humidity patterns in a screenhouse with a flat insect-proof screen roof and impermeable sloping walls – Computational fluid dynamics (CFD) results. *Biosystems Engineering*, 214, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.017>
- Villagran, E., Bojacá, C., & Akrami, M. (2021). Contribution to the sustainability of agricultural production in greenhouses built on slope soils: A numerical study of the microclimatic behavior of a typical colombian structure. *Sustainability*, 13(9), Artículo 4748. <https://doi.org/10.3390/su13094748>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019). Effects of surrounding objects on the thermal performance of passively ventilated greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(1), 20–27. <https://doi.org/10.4081/jae.2019.856>
- Villagrán, E., Flores-Velazquez, J., Bojacá, C., & Akrami, M. (2021). Evaluation of the microclimate in a traditional Colombian greenhouse used for cut flower production. *Agronomy*, 11(7), Artículo 1330. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071330>
- Villagrán-Munar, E. A., & Bojacá-Aldana, C. R. (2019). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero colgante colombiano aplicando simulación CFD. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(3), 1–10. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1132>
- Vivekanandan, M., Periasamy, K., Dinesh Babu, C., Selvakumar, G., & Arivazhagan, R. (2021). Experimental and CFD investigation of six shapes of solar greenhouse dryer in no load conditions to identify the ideal shape of dryer. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1409–1416. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.062>
- Wang, L., Ning, S., Zheng, W., Guo, J., Li, Y., Li, Y., Chen, X., Ben-Gal, A., & Wei, X. (2023). Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 14, Artículo 1165856. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856>
- Yeo, U.-H., Lee, S.-Y., Park, S.-J., Kim, J.-G., Choi, Y.-B., Kim, R.-W., Shin, J. H., & Lee, I.-B. (2022). Rooftop greenhouse: (1) Design and validation of a BES model for a plastic-covered greenhouse considering the tomato crop model and natural ventilation characteristics. *Agriculture*, 12(7), Artículo 903. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070903>