



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, desarrollado en conjunto con el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

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

² Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Unidad Agrícola Central. San José, Costa Rica. mquirosc@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 2022 y febrero 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 y errores menores al 10 % y, se propusieron mejoras pasivas y estructurales para optimizar el microclima interno del invernadero. **Resultados.** Durante el día, la temperatura y la humedad relativa promedio 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. **Conclusión.** La modelación permitió visualizar el comportamiento del invernadero, se propuso aumentar las dimensiones de la ventana cenital entre 11 m² a 20 m²; la instalación de dos recirculadores de aire y una sombra móvil con transmisibilidad de luz de 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.** 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 the Los Diamantes Agricultural 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 less than 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 %. The temperature showed significant variations in the vertical axis, but remained more homogeneous longitudinally, while the relative humidity showed greater variability in both directions. **Conclusion.** The modeling allowed visualization of the greenhouse behavior, and it was proposed to increase the dimensions of the zenith window from 11 m² to 20 m²; the installation of two air recirculators and a mobile shade with 50% light transmissibility.

Keywords: Thermodynamic equilibrium, greenhouse production, crop modelling, 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, humedad relativa y velocidad del viento, (Vivekanandan et al., 2020). La ventilación puede ser natural, mediante 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 permiten optimizar 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 que permite 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 directamente en los resultados obtenidos (28). 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 (29–30). 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 $k-\epsilon$ *Realizable*; sin embargo, en condiciones más complejas o con presencia de obstáculos, se prefiere el modelo *RNG* $k-\epsilon$ debido a su mayor precisión bajo flujos turbulentos. El modelo *SST* $k-\omega$ también resulta útil cuando se requiere mayor exactitud en el cálculo de la energía cinética turbulenta (32–35). 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 (31). 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 (31, 33). Asimismo, se utiliza el modelo de carga solar, que combina el trazado de rayos con el modelo *Superficie a Superficie* (S2S), lo que permite estimar con precisión la energía interna dispersada (34).

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 (34). Este fenómeno se describe mediante la ecuación de Darcy-Forchheimer, que incluye tanto la pérdida viscosa como la pérdida de energía interna del fluido [38, 39]. 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 (39). Además, elementos como las mallas antiáfidos pueden modelarse como medios porosos de bajo espesor (menor a 0,05 m) [38]. En este estudio, se evaluó la termodinámica de un invernadero mediante simulación CFD.

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 (EELD), 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 una altura de 6,50 m hasta la parte alta del cenital, la apertura de cenital era 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 (HDPE).

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 una altura de 0,30 m. 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 plantas, para un total de 756 plantas.

Registro de variables climáticas

Para obtener los datos climáticos se utilizó una estación meteorológica a nivel externo con rangos de temperatura -40 °C a 65 °C ($\pm 0,30^\circ\text{C}$), humedad 1 a 100% ($\pm 2\%$), velocidad de viento de 0 a 89 m/s (0,90 m/s), dirección de viento 1 a 360° (3°) y radiación 0 a 1800 W/m² (5% de la escala total), mientras que, para las condiciones internas

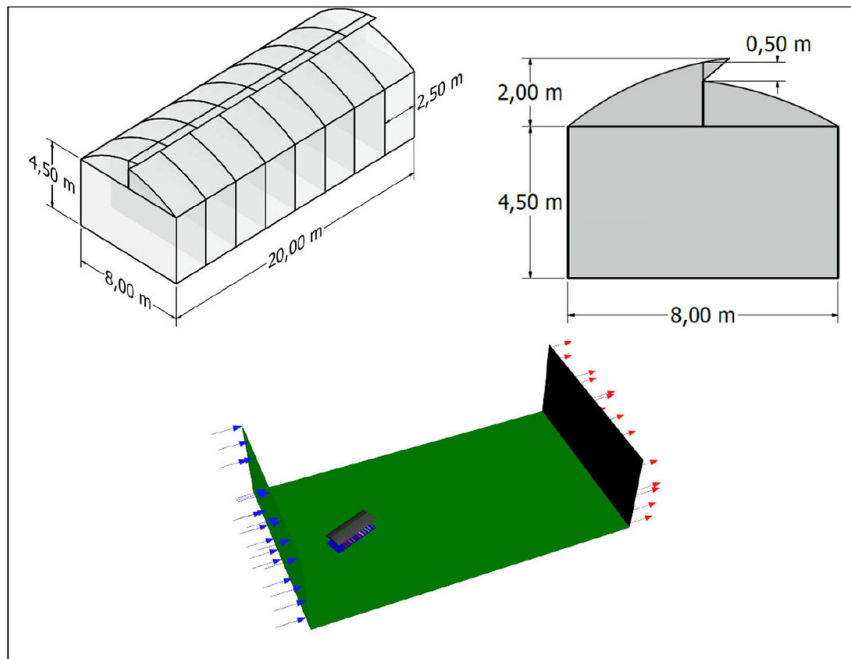


Figura 1. Dimensiones y condiciones de frontera del modelo CFD del invernadero en estudio ubicado en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes (CIA Los Diamantes), Limón Costa Rica, 2023.

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

se instalaron 12 registradores con recopilación automática de datos a tres diferentes alturas (inferior: 1,50 m, media: 3,00 m y superior: 4,50 m), situados en cuatro cuadrantes horizontales equidistantes (C1, C2, C3 y C4) (Figura 2) dentro del área del invernadero durante siete meses (desde agosto de 2022 hasta febrero de 2023).

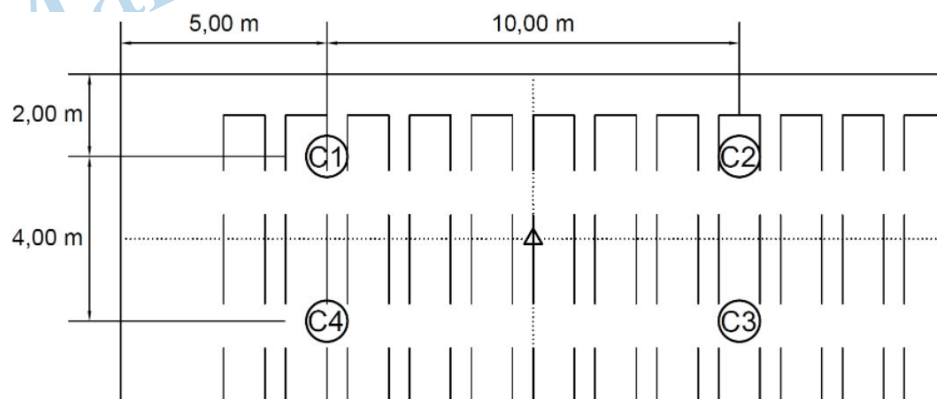


Figura 2. Distribución de sensores en el interior del invernadero. Simbología: ○ → Varas de bambú con sensores de temperatura y humedad relativa; Δ → Vara de bambú con sensor de velocidad y dirección d viento; C → Cuadrante. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 2. Sensor distribution inside the greenhouse. Symbols: ○ → Bamboo poles with temperature and relative humidity sensors; Δ → Bamboo pole with wind speed and direction sensor; C → Quadrant. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

Los registradores tuvieron un rango de trabajo de temperatura entre los -40°C a 70°C ($\pm 0,25^{\circ}\text{C}$) y de humedad relativa entre 0 a 100% ($\pm 2,50\%$). Esto permitió el análisis de temperatura y 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 ($\pm 1,1$ m/s) y dirección de 0 a 355° ($\pm 7^{\circ}$) dentro del invernadero a la 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 diferentes 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 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) hora 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.

Se evaluaron tres ciclos de cultivo, cada siembra estuvo conformada por 12 camas espaciadas 0,50 m entre sí, las cuales midieron 1,00 m de ancho, 7,00 m de largo, con una altura de 0,30 m. El marco de plantación fue de 0,20 m entre plantas, 0,20 m entre hileras, tres hileras por cama; por cada cama se contaron entre 60 y 66 plantas, para un total de 756 plantas. El primer ciclo de cultivo se evaluó desde el 6 de octubre al 3 de noviembre del 2022; el segundo ciclo de cultivo desde el 17 de noviembre al 15 de diciembre del 2022; el tercer ciclo de cultivo desde el 13 de enero al 13 de febrero de 2023.

Modelo mecánico y discretización

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

Los lados perpendiculares a la dirección del viento y hacia arriba el volumen se amplió cinco veces la altura máxima del invernadero (5H), hacia el lado a barlovento se agrandó tres veces (3H), y hacia el lado a sotavento se extendió 15 veces (15H). En el proceso de discretización se elaboró una malla con un total de 482664 elementos. A esta malla se le aplicó 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 con los datos necesarios para realizar los cálculos dependientes del tiempo pertinentes 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 et al., 2019). Se utilizaron los submodelos de viscosidad - turbulencia $k-\epsilon$ (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, compuestos por el aire, el oxígeno y el nitrógeno; 2) mezcla, que se habilita al utilizar 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 regiones, 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 fueron tomadas de una investigación realizada por Fang et al. (2020), según 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 recopilaban los datos de la estación meteorológica presente en el CIA 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}) (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2006; Garita Cerdas, 2019). El cálculo del flujo másico de vapor de agua del medio poroso se determinó mediante el producto de estos parámetros, la cantidad de plantas y la densidad del aire, dividido por el volumen aproximado que ocupa el follaje del cultivo.

El modelo desarrollado incluyó una frontera como entrada de velocidad. El aire de ingreso varió su velocidad y dirección en cada caso, así como su temperatura y humedad relativa. Las dos fronteras perpendiculares al flujo de aire se establecieron como fronteras de simetría. Las dos fronteras superior e inferior, así como el techo del invernadero, se establecieron 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 debida 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):

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

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

La ecuación 2 corresponde al cálculo del flujo de calor en el suelo cultivado, donde R_l 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 α_{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). Dicho 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 que se da 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 (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008). El coeficiente de transmisión por radiación del polietileno es de 0,89.

Proceso de validación del modelo

Se calculó el error absoluto medio (MAE) según la ecuación 4 y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) por medio de 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. Para esta investigación se consideró como aceptable una diferencia entre las mediciones de campo y los datos de simulación menor al 10% (Bournet & Rojano, 2022). Las fechas de estos casos validados fueron: a) casos intervalo nocturno IIb (10-12-22, 05:30), IIIb (08-10-22, 05:30) y IVb (23-01-23, 05:45) y el caso IIIa (19-10-22, 11:00) del intervalo diurno. Además, posterior a la validación se seleccionaron los casos IIb, IVb y IIIa para ser analizados.

Propuestas de mejora

Se realizaron propuestas de mejora para el invernadero en estudio las cuales benefician y optimizan su funcionamiento para el cultivo y producción de lechuga. Estas propuestas funcionarían como medidas correctivas debido a que la estructura ya está construida, y la instalación de equipos de automatización, además de requerir una inversión muy alta, podría comprometer al invernadero estructuralmente. Las propuestas se realizaron con el fin de regular y homogeneizar las condiciones críticas encontradas en los análisis previos en el interior del invernadero en términos de temperatura y humedad relativa, y teniendo en consideración las condiciones externas que afectan la dinámica interna.

Resultados

Comportamiento de los variables climáticas registrados

Los seis escenarios adversos basados en la temperatura (Ia, IIIa, IVa, IIb, IIIb, 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 su magnitud fue de 0,33 m/s en dirección ESE, mientras que la velocidad promedio fue de 0 m/s.

Cuadro 1. Datos de entrada para el modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) desarrollado del invernadero ubicado en el Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes (EELD), Limón Costa Rica, 2023.

Table 1. Input data for the Computational Fluid Dynamics (CFD) model developed for the greenhouse located at the Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (EELD), Limón, Costa Rica, 2023.

	Casos	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (rumbo, ° azimuth)	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

A. Temperatura (°C) según altura y cuadrante

La temperatura promedio a nivel vertical obtuvo 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 registradas 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 se tiene una desviación estándar 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.

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 sin presentar diferencias; solamente se registraron diferencias significativas entre ciclos de producción ($p < 0,05$). El intervalo nocturno tuvo diferencias por nivel de altura, entre cuadrantes horizontales y ciclos de cultivo. Los promedios de humedad por altura se mantuvieron entre 65 y 73 % durante el intervalo diurno (Figura 5A); en el intervalo nocturno, se registraron valores entre 85 y 100 % (Figura 5B).

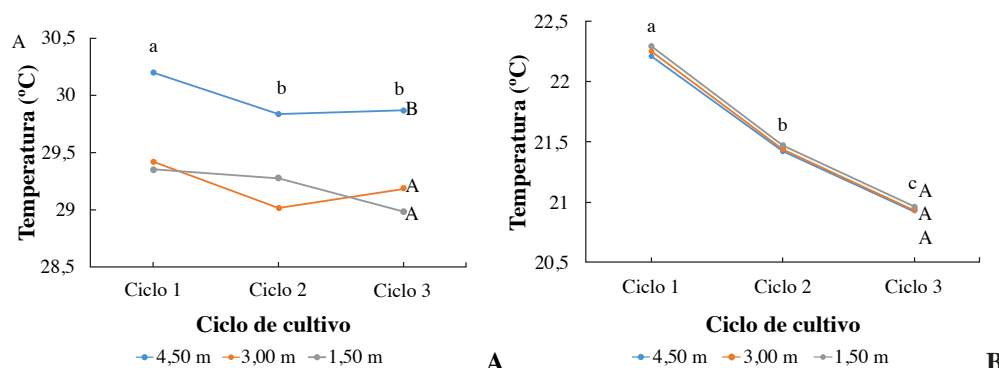


Figura 3. Análisis vertical de la temperatura en los tres ciclos productivos de lechuga. A) Intervalo diurno y B) Intervalo nocturno. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre alturas, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 3. Vertical temperature analysis in the three lettuce production cycles. A) Diurnal interval and B) Nocturnal interval. Different uppercase letters indicate significant differences between heights, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

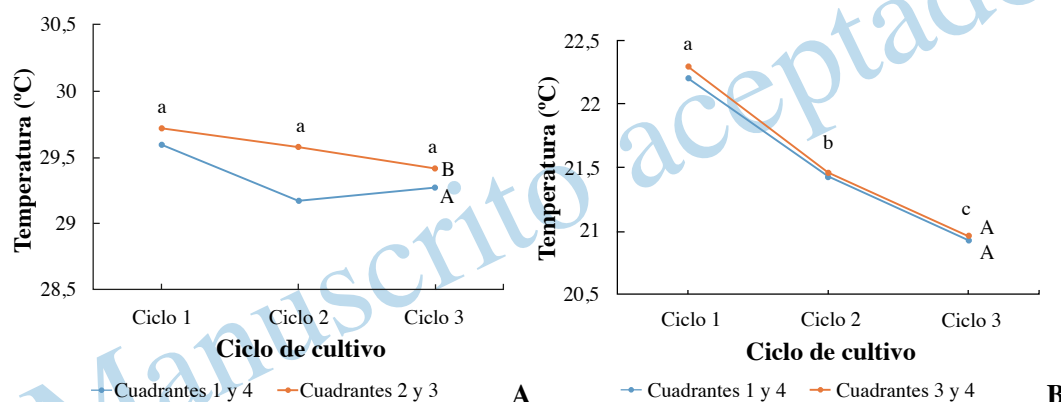


Figura 4. Análisis horizontal de la temperatura en los tres ciclos productivos de lechuga. A) Intervalo diurno. B) Intervalo nocturno. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre cuadrantes horizontales, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 4. Horizontal analysis of temperature across three production cycles of lettuce. A) Daytime interval. B) Nighttime interval. Different uppercase letters indicate significant differences between horizontal quadrants, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

Los resultados de la humedad relativa en los cuadrantes horizontales no presentaron diferencias significativas en el intervalo diurno (Figura 6A), pero si entre ciclos de cultivo. En el análisis del intervalo nocturno, existen diferencias significativas tanto entre cuadrantes horizontales como entre ciclos de producción (Figura 6B). Además, se muestra 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 casos correspondientes al intervalo nocturno (IIb, IIIb y IVb) y un caso del intervalo diurno (IIIa). Los casos Ia y IIa no se validaron debido a

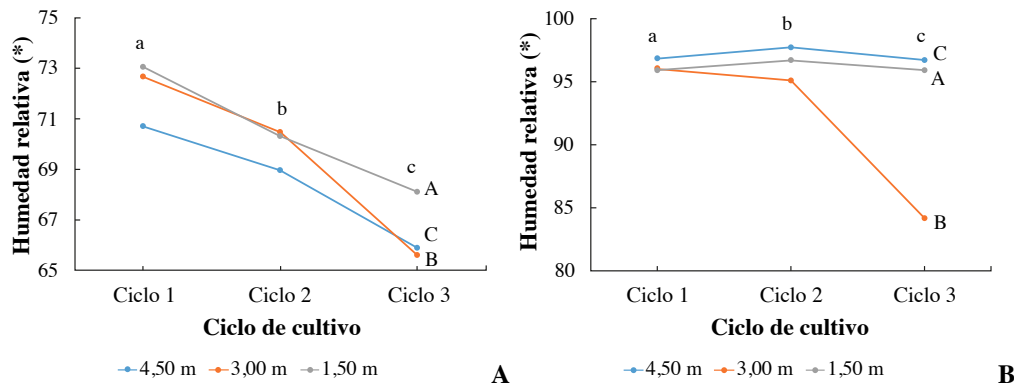


Figura 5. Análisis vertical de la humedad relativa en los tres ciclos productivos de lechuga. A) Intervalo diurno. B) Intervalo nocturno. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre alturas, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 5. Vertical analysis of relative humidity across three production cycles of lettuce. A) Daytime interval. B) Nighttime interval. Different uppercase letters indicate significant differences between heights, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles. Los Diamantes Agricultural Innovation and Livestock Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

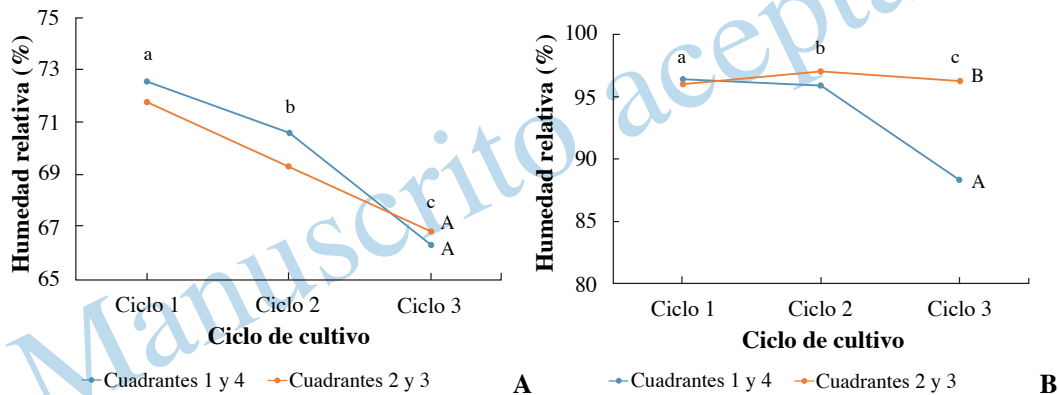


Figura 6. Análisis horizontal de la humedad relativa en los tres ciclos productivos de lechuga. A) Intervalo diurno. B) Intervalo nocturno. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre cuadrantes horizontales, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre ciclos de cultivo. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica. 2023.

Figure 6. Horizontal analysis of relative humidity in the three lettuce production cycles. A) Daytime interval. B) Nighttime interval. Different uppercase letters indicate significant differences between horizontal quadrants, and different lowercase letters indicate significant differences between cultivation cycles. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

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 (intervalo nocturno) muestran 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 promedios superiores al 90 % en los tres casos. Para efectos demostrativos se incluye el caso IIb, cuyos porcentajes promedio de error obtenidos 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).

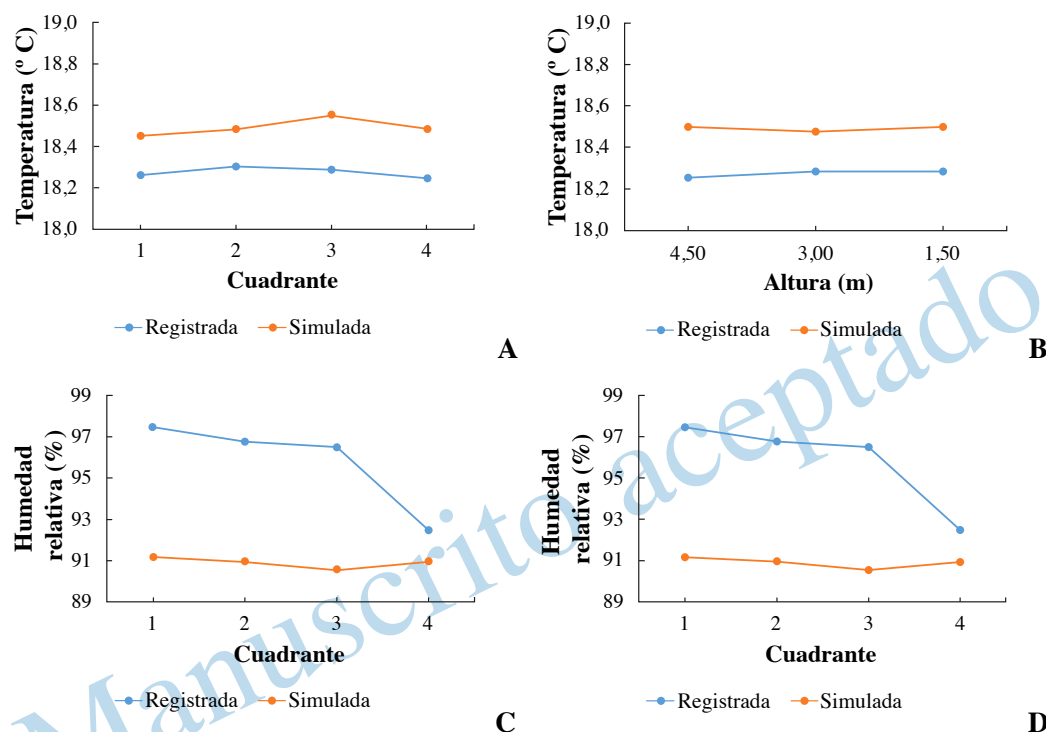


Figura 7. Comparación entre los datos registrados y los simulados para el caso IIb según cuadrante (1, 2, 3 y 4) y altura (1,50 m, 3,00 m y 4,50 m). A) Temperatura por cuadrante. B) Temperatura por altura. C) Humedad relativa (%) por cuadrante. D) Porcentaje de humedad relativa por altura. Centro de 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 Innovation and Livestock Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica, 2023.

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 cambios en la variedad de lechuga utilizada a 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 tienen implicaciones negativas en cuanto al desarrollo del cultivo y un aumento en el consumo de los sistemas de riego. Por la noche, la humedad relativa obtuvo 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.

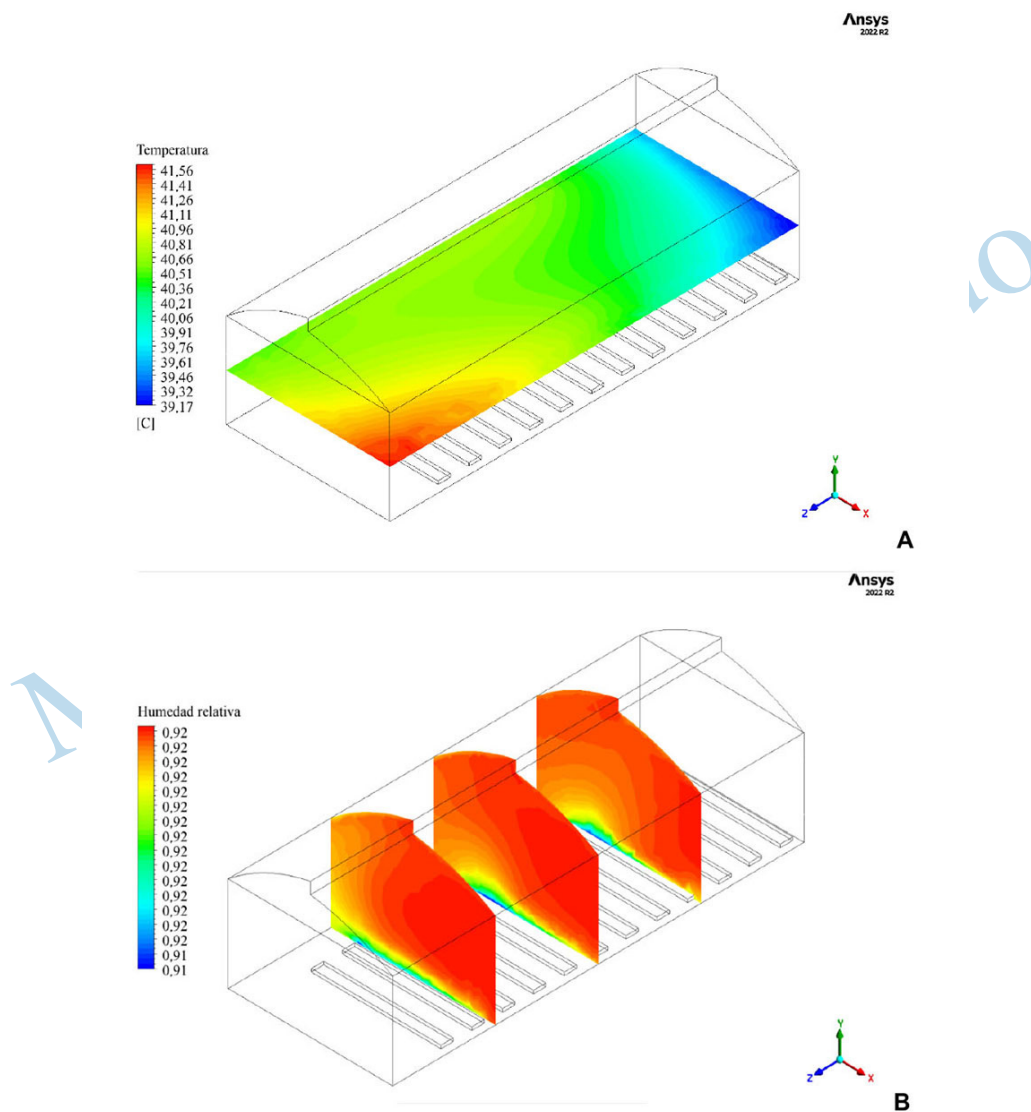


Figura 8. A) Contorno Horizontal temperatura (°C) para el caso IIIa. B) Contorno transversal de humedad relativa (%) para el caso I Iib. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica, 2023.

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 (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

Casos validados: vectores de velocidad

La simulación indica que la velocidad del viento es insuficiente para su propia ventilación pasiva. Únicamente en el caso IIIa supera el 1 m/s en la pared sur del invernadero, mientras que en el resto del espacio las velocidades se mantienen por debajo de 0,50 m/s (Figura 9A). Sin embargo, según los datos de entrada para la magnitud de la velocidad del viento fueron de 0,0 m/s se determina que este comportamiento en los vectores de velocidad se da por el efecto de la interacción entre las variables termodinámicas y como estas fueron representadas en el modelo, además de inestabilidades en el cálculo.

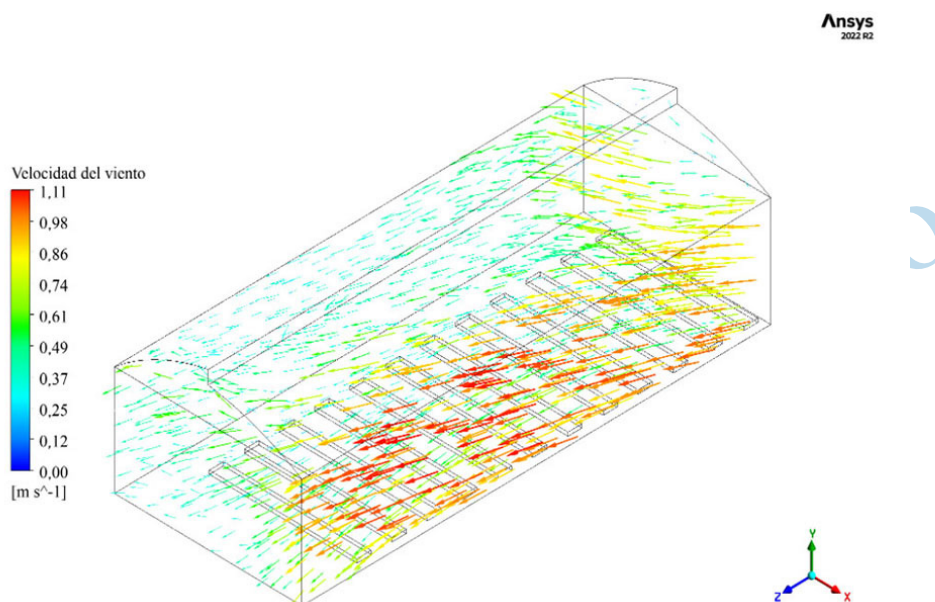


Figura 9. Vector de velocidad analizado del caso IIIa. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica, 2023.

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

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

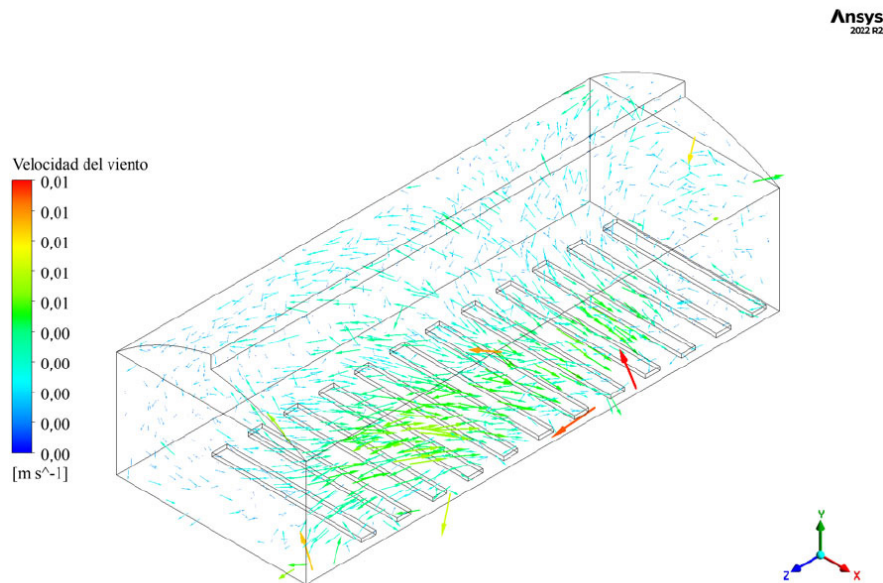


Figura 10. Vectores de velocidad del viento [m s^{-1}] analizados del caso IIb. Centro de Innovación Agropecuaria Los Diamantes, Limón, Costa Rica, 2023.

Figure 10. Analyzed velocity vectors of wind in case IIb. Los Diamantes Agricultural and Livestock Innovation Center (CIA Los Diamantes), Limón, Costa Rica. 2023.

Discusión

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

El análisis de la temperatura mostró rangos óptimos para el cultivo de lechuga (15°C a 26°C) (Ahmed et al., 2020; Zhou et al., 2023), durante los tres ciclos de cultivo. No obstante, se cuantificó una alta variabilidad en las temperaturas, pues se cuantificó una desviación estándar mínima de $4,81^{\circ}\text{C}$ en el intervalo diurno y de $1,23^{\circ}\text{C}$ en el nocturno. Las temperaturas máximas superaron el rango óptimo durante el día, especialmente cerca del mediodía. Esto puede desencadenar una serie de efectos negativos en la planta y el fruto debido al estrés abiótico, por tanto, se disminuye su calidad comercial (Khan et al., 2022). La humedad relativa se mantuvo en su mayoría cerca de 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 desarrollo 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 está a 20 m del invernadero y la estación meteorológica utilizada estuvo instalada a 500 m de distancia. Idealmente, el equipo de medición debe ubicarse 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 dado sus porcentajes de error promedio inferiores al 10 %. Los contornos de los casos del intervalo nocturno muestran que la temperatura y la humedad relativa fue uniforme en el recinto para los casos de temperatura más baja y mostró 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 muestran 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 a 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 mejorar 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 producción de productos agrícolas.

Las propuestas de mejora están orientadas a contrarrestar las problemáticas encontradas 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 está 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 (mayor a 35 °C y mayor a 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 realizan 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 un 12,50 y un 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 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 reducción de entre un 30 y un 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 diferentes alturas analizadas a lo largo de los tres ciclos de cultivo de lechuga, mas no en el análisis de cuadrantes horizontales, donde mostró un comportamiento más uniforme. La humedad relativa mostró una alta variabilidad tanto entre las diferentes alturas analizadas como por 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 necesario implementar ajustes en el diseño y 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., 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., Froushani, S., Sultan, M., & Bahrami, M. (2020). Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. *Applied Thermal Engineering*, 181, Article 115979. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115979>
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Fluent user's guide* (Vol. 15). ANSYS Inc. 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 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, Article 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>
- 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), Article 21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4030021>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for Mediterranean climate areas*. <https://www.fao.org>
- Garita Cerdas, A. (2019). *Diseño de Sistema de Riego por Goteo en Ambientes Protegidos para Cultivo de Hortalizas, en la Zona de Pacayas y Cipreses, Cartago* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/11286>
- Guo, J., Zhang, Y., Liu, W., Zhao, J., Yu, S., Jia, H., Zhang, C., & Li, Y. (2022). Incorporating in vitro bioaccessibility into human health risk assessment of heavy metals and metalloid (As) in soil and pak choi (*Brassica chinensis* L.) from greenhouse vegetable production fields in a megacity in Northwest China. *Food Chemistry*, 373, Article 131477. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131488>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 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., 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, 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>
- 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). Article 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), Article 949128. <https://doi.org/10.1155/2014/949128>
- López, A., Molina-Aiz, F., Valera, D., & 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 (Switzerland)*, 16(5), Article 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., & Bouriden, 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>
- 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>
- 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)
- Vásquez Camacho, J. G. (2015). *Evaluación agronómica de cinco variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) en tres ciclos de siembra consecutivos, en San Miguel de la Tigra, San Carlos, Alajuela, Costa Rica* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6469/evaluacion_agronomica_cinco_variedades_lechuga.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- 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. <http://opn.to/a/V8J7U>
- 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>
- 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 (Switzerland)*, 13(9). Article 4748 <https://doi.org/10.3390/su13094748>
- 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), Article 1330. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071330>

- Vivekanandan, M., Periasamy, K., Dinesh Babu, C., Selvakumar, G., & Arivazhagan, R. (2020). 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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856>
- Yeo, U., Lee, S., Park, S., Kim, J., Choi, Y., Kim, R., Shin, J., & Lee, I. (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), Article 903. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070903>
- Zhou, J., Fagnano, M., 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), Article 916. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030916>

Manuscrito aceptado