



Ventilación natural en invernadero con mallas anti-insecto evaluadas con un modelo computacional de fluidos¹

Natural ventilation in greenhouse with anti-insect screens evaluated with a computational fluid model

Edwin Andrés Villagrán², Jorge Eliecer Jaramillo³, Rommel Igor León-Pacheco⁴

- ¹ Recepción: 24 de febrero, 2020. Aceptación: 1 de junio, 2020. Este trabajo formó parte del proyecto Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos en zonas tropicales: opción de intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto de cambio climático en ALC financiado por El Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO).
- ² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Tibaitata, Mosquera, Cundinamarca, Colombia. evillagran@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0003-1860-5932>).
- ³ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia, Colombia. jejaramillo@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0003-2515-5706>).
- ⁴ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Caribia, Sevilla, Zona Bananera, Magdalena, Colombia. rleon@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-9928-5282>).

Resumen

Introducción. En Colombia, la producción hortícola en el trópico bajo es limitada principalmente por factores bióticos como el ataque de plagas, patógenos y factores abióticos como valores extremos de temperatura, radiación solar, viento y precipitación. **Objetivo.** Evaluar dos tipos de mallas anti-insecto en las áreas de ventilación de un invernadero colombiano ventilado de formado natural con el fin de analizar el efecto sobre las tasas de ventilación y el microclima generado. **Materiales y métodos.** El Estudio se desarrolló en el año 2019 en el departamento de Magdalena, Colombia. El enfoque metodológico incluyó el uso de modelo computacional de fluidos (CFD) 2-D para el desarrollo de quince simulaciones en estado estacionario, el modelo CFD fue validado experimentalmente en el prototipo del invernadero real evaluado. **Resultados.** Los parámetros de bondad de ajuste entre los datos medidos y simulados mostraron valores de error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para la temperatura y la humedad relativa de 0,15 y 0,32 °C, 2,41 y 2,73 %, respectivamente. Hubo una reducción promedio de las tasas de ventilación entre 55,3 y 77,1 % en comparación con el escenario de referencia que no incluyó la presencia de mallas anti-insecto, esta reducción generó modificaciones en el comportamiento de las variables temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero, con una marcada distribución espacial heterogénea. **Conclusión.** Las condiciones micro climáticas más inadecuadas se presentaron en escenarios de baja velocidad de viento exterior, por lo tanto, es recomendable seleccionar e implementar algún tipo de malla anti-insecto en las áreas de ventilación de un invernadero basado en el comportamiento local de esta variable.

Palabras clave: tasa de ventilación, microclima, flujo de aire, temperatura, humedad relativa.



Abstract

Introduction. In Colombia, horticultural production in the low tropics is limited mainly by biotic factors such as pest attacks, pathogens, and abiotic factors such as extreme values of temperature, solar radiation, wind, and precipitation. **Objective.** To evaluate two types of anti-insect screens in the ventilation areas of a naturally ventilated Colombian greenhouse in order to analyze the effect on the ventilation rates and the generated microclimate. **Materials and methods.** The study was carried out in 2019 in the department of Magdalena, Colombia. The methodological approach included the use of a 2-D computational fluid model (CFD) for the development of fifteen steady-state simulations. The CFD model was experimentally validated in the prototype of the real greenhouse evaluated. **Results.** Goodness-of-fit parameters between measured and simulated data showed absolute mean error (MAE) and root mean squared error (RMSE) values for temperature and relative humidity of 0.15 and 0.32 °C, 2.41 and 2.73 %, respectively. There was an average reduction in ventilation rates between 55.3 and 77.1 % compared to the reference scenario that did not include the presence of anti-insect screens, this reduction generated modifications in the behavior of the temperature and relative humidity variables inside the greenhouse, with a marked heterogeneous spatial distribution. **Conclusion.** The most inadequate microclimatic conditions occurred in scenarios of low external wind speed; therefore, it is recommended to select and implement some type of anti-insect screen in the ventilation areas of a greenhouse based on the local behavior of this variable.

Keywords: ventilation rate, microclimate, airflow, temperature, relative humidity.

Introducción

Los invernaderos pasivos con cubierta de plástico son ampliamente utilizados a nivel mundial, principalmente por ser estructuras simples de bajo costo y bajo nivel tecnológico (Muñoz et al., 1999). Sin embargo, estas ventajas económicas pueden producir consecuencias negativas desde el punto de vista técnico si no se cuenta con una estructura de invernadero con un diseño adecuado. Es característico que en este tipo de estructuras exista una heterogeneidad espacial y un comportamiento inadecuado de las principales variables ambientales (radiación, temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor, velocidad del viento, evapotranspiración) relacionadas con la producción agrícola, como consecuencia se da un crecimiento limitado de las plantas, así como problemas asociados con plagas y enfermedades (Piscia et al., 2012b).

La ventilación natural juega un papel relevante en el control del microclima generado en el interior de los invernaderos, este fenómeno permite gestionar los excesos térmicos y humedad producidos en el ambiente interior del invernadero, adicionalmente se hace posible la renovación y el aporte del CO₂ consumido por las plantas a través del proceso de fotosíntesis (Molina-Aiz et al., 2009; He et al., 2017).

En invernaderos equipados con áreas de ventilación en la zona de cubierta y en sus cuatro costados, las fuerzas motrices del fenómeno de ventilación son debidas a: (i) el efecto eólico generado por diferencias de presión entre las áreas de ventilación y las respectivas zonas expuestas a barlovento y sotavento, respectivamente; (ii) el efecto térmico generado por la flotabilidad debida al cambio de densidad del aire, y (iii) las fluctuaciones de presión y velocidad del viento en las áreas de ventilación generadas por la turbulencia del movimiento del aire (López et al., 2011).

La eficiencia de la ventilación natural depende de factores clave como la velocidad del viento, la gradiente térmica generada entre el ambiente interior y exterior del invernadero, la geometría y el tamaño de las áreas de ventilación y la combinación de aberturas laterales y techo (Bartzanas et al., 2004; Villagrán y Bojacá, 2019a; b). El movimiento del aire en el interior del invernadero también se ve fuertemente reducido y alterado, debido al uso, casi generalizado, de mallas a pruebas de insectos en las áreas de ventilación. Con el uso de estas metodologías,

se busca impedir el ataque de plagas como mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y trips (*Frankliniella occidentalis*), que generan daños importantes en las plantas y obligan a un excesivo uso de pesticidas químicos, produciendo pérdidas económicas y daños ambientales considerables (Fatnassi et al., 2003).

Las simulaciones numéricas mediante la técnica de dinámica de fluidos computacionales (CFD), permite resolver numéricamente para el tiempo y el espacio las ecuaciones parciales no lineales de momento, masa y energía que rigen el movimiento de un fluido en el interior de un invernadero, estas ecuaciones se conocen como Navier-Stokes. Esta técnica discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes a un arreglo de ecuaciones algebraicas que se solucionan mediante técnicas de resolución numérica, que permiten obtener una solución cualitativa y cualitativa del flujo de aire en el interior del invernadero y sus efectos sobre la distribución del microclima (Norton et al., 2007).

El modelado y simulación se realiza en tres fases específicas: (i) el pre-proceso por medio del cual se define el problema de estudio, lo que incluye generación de la geometría y su descomposición en una grilla numérica, así como la definición de las condiciones de frontera, (ii) el proceso que incluye el cálculo de la solución y chequeo de la convergencia numérica a partir de diagramas de residuos, y (iii) el post procesamiento que incluye la obtención de gráficas, datos espaciales de las variables micro climáticas estudiadas y su validación con resultados obtenidos experimentalmente (Flores-Velázquez et al., 2014).

La metodología CFD ha sido ampliamente utilizada para estudios que involucran la ventilación en edificios agrícolas en las dos últimas décadas (Bournet y Boulard, 2010). Se ha demostrado que es una herramienta ágil, efectiva y precisa para el análisis del fenómeno de ventilación y su influencia sobre el clima interior generado en invernaderos (Nebballi et al., 2012; Teitel y Wenger, 2014). Con esta herramienta es posible simular el uso de mallas a pruebas de insectos en las áreas de ventilación, lo que permite observar las caídas de presión inducidas por la presencia de estas mallas en los flujos de aire, afectando de manera negativa las tasas de intercambio de aire, con lo cual se producen aumentos en los valores de la temperatura y condiciones de humedad subóptimas en el interior de los invernaderos (Fatnassi et al., 2006).

Estudios previos han demostrado que la reducción de la tasa de ventilación en invernaderos equipados con ventilaciones laterales y cenitales, y presencia de pantalla anti-insecto oscilan entre 19 y 89 %, dependiendo de la porosidad de la malla (Bartzanas et al., 2002; Molina-Aiz et al., 2004; Majdoubi et al., 2007), causando aumentos en el valor medio de la temperatura interior con valores superiores a los 4 °C aproximadamente (Baeza et al., 2009). A nivel comercial se puede encontrar una gran variedad de pantallas anti-insecto que generalmente varían en tipo de material, textura, color, tamaño y forma del poro, este último factor es clave en el movimiento del flujo de aire, por lo tanto, su caracterización aerodinámica es necesaria para lograr cuantificar la permeabilidad, la caída de presión y la consecuente pérdida de flujo generada en la barrera anti-insecto, en la literatura científica se pueden encontrar diversos estudios dedicados a esta temática (Valera et al., 2006; Pérez-Vega et al., 2016; López et al., 2016; Santolini et al., 2019).

Otra limitante del cultivo bajo cubierta en Colombia es el no uso de mallas anti-insecto, las cuales no son consideradas por los agricultores por el desconocimiento de la eficiencia de dichos materiales a la exclusión de insectos, los costos de inversión inicial y la afectación sobre la tasa de ventilación de los invernaderos. Por lo anterior, existe la necesidad de generar información que pueda ser una herramienta de decisión en el ámbito local y para condiciones de clima cálido, puesto que los invernaderos colombianos ubicados en el trópico alto tienen ya un avance de estudio significativo como puede revisarse en las investigaciones desarrolladas por Villagrán y Bojacá (2019 a; b; c) y Villagrán et al. (2019).

En la región Caribe de Colombia, la producción hortícola es limitada principalmente por factores climáticos extremos, por lo tanto, con esta investigación se pretende impulsar la producción de hortalizas bajo cubierta con enfoque de agricultura familiar. El objetivo de este estudio fue evaluar dos tipos de mallas anti-insecto en las áreas de ventilación de un invernadero ventilado de formado natural, con el fin de analizar el efecto sobre las tasas de ventilación y el microclima generado.

Materiales y métodos

Descripción del invernadero y condiciones climáticas

El experimento se desarrolló durante el periodo de abril a diciembre de 2019 en un invernadero tipo capilla cubierta plana, construido en acero estructural y cubierta de polietileno, ubicado en la región caribe colombiana en el municipio de Sevilla, departamento de Magdalena, Colombia, en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). El área cubierta fue de 500 m², equivalentes a un invernadero de 25 m de ancho y 20 m de largo (Figura 1). El eje transversal del invernadero se ubicó de forma paralela a la dirección dominante del viento.

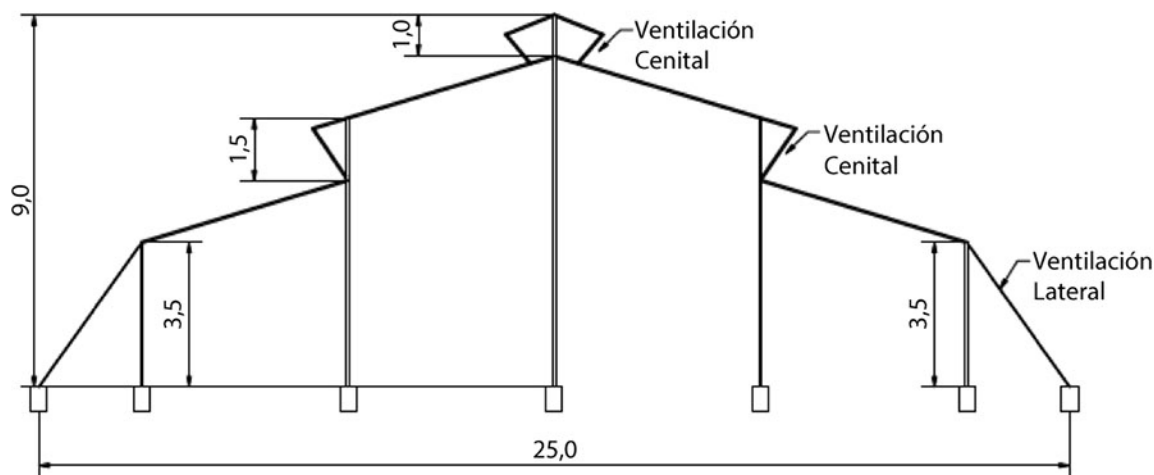


Figura 1. Perfil transversal del invernadero cubierto plana construido y evaluado el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Figure 1. Cross-sectional profile of the flat roof greenhouse built and evaluated by the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

El invernadero estaba equipado con ventilaciones laterales en sus cuatro costados, con un área de ventilación efectiva de 3,5 m, conformando una superficie de ventilación lateral de 315 m² (63 % de la superficie cubierta) y unas superficies de ventilación cenital de techo de 1,5 y 1 m, respectivamente, para una superficie de ventilación total de techo de 100 m² (20 % de la superficie cubierta), las áreas de ventilación no contaba con un sistema de cierre y apertura, por lo tanto, la configuración de apertura de las áreas de ventilación fue del 100 % disponible.

La región donde está ubicado el invernadero presenta un promedio de la temperatura media multianual para un periodo de cinco años de 28,16 °C, con una media máxima y mínima de 33,6 y 23,2 °C, respectivamente, la humedad relativa presentó un comportamiento promedio con valores superiores al 65 % y precipitación anual con valor medio de 1245,1 mm (Figura 2). Las velocidades del viento registradas mostraron un comportamiento entre el intervalo de 0,2 y 5 m s⁻¹ y las direcciones predominantes hacia donde se dirigía se encontraron en el cuadrante W-S (90-180°).

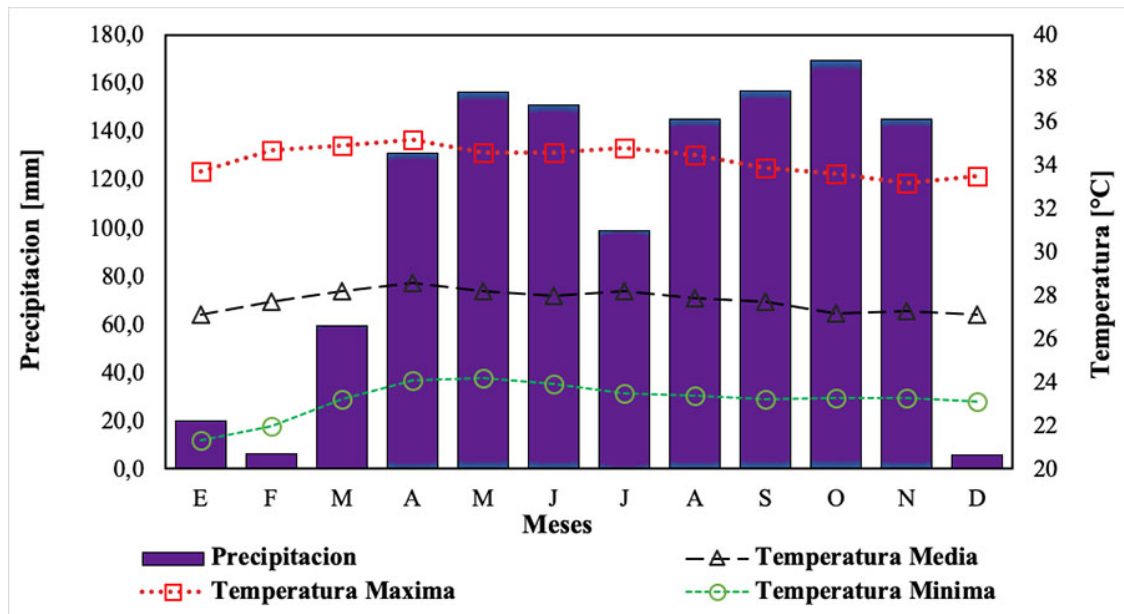


Figura 2. Climograma del Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Figure 2. Climogram of the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Modelo numérico de la dinámica de fluidos computacionales (CFD)

La simulación numérica de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) resuelve, por medio de volúmenes finitos, la forma promediada de las ecuaciones de Navier-Stokes (Kim et al., 2017). En este estudio se usó el software comercial Ansys-Fluent (Ver. 18.1, ANSYS Inc., PA, USA). Para el cálculo del flujo de fluido, la ecuación de conservación, cantidad y energía con momento bidimensional escalar se representa en la ecuación 1.

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad (1)$$

Donde φ es la variable de interés, ρ es la densidad del aire, t es el tiempo, u_j es cada uno de los componentes de la velocidad, x_j es la coordenada en cada dirección, Γ y S_φ son el coeficiente de difusión y el término fuente definido por el usuario (Chen et al., 2015). La parte fluctuante del flujo se simula mediante la aplicación de modelos de turbulencia, en estudios enfocados a ventilación natural de invernaderos, el modelo ampliamente utilizado es el $k - \epsilon$ estándar y permite resolver dos ecuaciones de transporte adicionales, una para la tasa de disipación y otra para la energía cinética turbulenta (Limtrakarn et al., 2012). Se consideró la hipótesis de Boussinesq válida para estudios de ventilación natural en invernaderos donde los gradientes térmicos sean inferiores a 20 °C (Baeza et al., 2009). Este método permite acoplar en la ecuación de momento las fuerzas de gravedad debidas a los cambios en la densidad del aire producida por efecto térmico, este modelo se expresa en la forma que se describe en la ecuación 2.

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (2)$$

Donde β es el coeficiente de expansión térmica, g es la fuerza de gravedad, ρ y T son la densidad y la temperatura del aire con el subíndice representando un estado de referencia.

Se consideró la ecuación de energía y un modelo de radiación para el dominio computacional, la cual se seleccionó el modelo de ordenadas discretas (DO) con discretización angular. Este modelo de radiación ha sido ampliamente utilizado en estudios bajo invernadero (Mesmoudi et al., 2017; Villagrán-Munar y Bojacá-Aldana, 2019) y permite calcular la radiación y los intercambios convectivos entre la cubierta, el techo y las paredes de una estructura que, en el caso de invernaderos, son tratadas como medios semitransparentes. La ecuación 3 representa el modelo de radiación DO (Wu y Lei, 2016).

$$\nabla \cdot \left(I_\lambda \left(\begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{r} \end{matrix}, \begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s} \end{matrix} \right) \begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s} \end{matrix} \right) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda \left(\begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{r} \end{matrix}, \begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s} \end{matrix} \right) = \alpha_\lambda n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda \left(\begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{r} \end{matrix}, \begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s}' \end{matrix} \right) \Phi \left(\begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s} \end{matrix}, \begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s}' \end{matrix} \right) d\Omega' \quad (3)$$

Donde I_λ es la intensidad de la radiación a una longitud de onda; $\begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{r} \end{matrix}, \begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s} \end{matrix}$ son los vectores que indican la posición y la dirección, respectivamente; $\begin{matrix} \Rightarrow \\ \underline{s}' \end{matrix}$ es el vector de dirección de la dispersión; σ_s, α_λ son los coeficientes de dispersión y absorción espectral; n es el índice de refracción; ∇ es el operador de divergencia; σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$); Φ, T y Ω son la función de fase, la temperatura local ($^\circ\text{C}$) y el ángulo sólido, respectivamente.

La presencia de mallas anti-insecto en las ventilaciones laterales y cenitales se modeló como un medio poroso gobernado por la ecuación 4, que representa la ley de Darcy-Forchheimer.

$$S_\varphi = - \left(\left(\frac{u}{K_p} \right) u + \left(\frac{C_f}{\sqrt{K_p}} \right) \rho u^2 \right) \quad (4)$$

Donde, S_φ es el término fuente incluido en la ecuación de movimiento que representa las fuerzas de arrastre inducidas por las mallas anti-insecto, y ρ y u son la densidad y la viscosidad dinámica del fluido, los valores de K_p y C_f son coeficientes inerciales derivados de las propiedades aerodinámicas de cada pantalla y se establecen en función de su grado de porosidad (ϵ), con las ecuaciones 5 (permeabilidad del medio poroso) y 6 (factor de inercia del medio poroso) planteadas por Miguel (1998).

$$K_p = 3,44 \times 10^{-9} \epsilon^{1,6} \quad (5)$$

$$C_f = \frac{(4,3 \times 10^{-2})}{\epsilon^{2,13}} \quad (6)$$

El modelo numérico no consideró la presencia de ninguna especie vegetal, esto con el fin de obtener una solución independiente del tipo y edad de cultivo, y adicionalmente de realizar el estudio del fenómeno de ventilación en el peor escenario posible desde el punto de vista térmico, esto ocurre cuando no hay plantas en el invernadero o el cultivo está en fases fenológicas iniciales, donde su aporte sobre el microclima es insignificante y, por lo tanto, el valor es despreciable en las simulaciones. Las simulaciones numéricas se desarrollaron en condiciones de estado estable, el método de acoplamiento usado para solucionar las ecuaciones de presión y

velocidad fue el esquema SIMPLE, con el que se adoptaron unos criterios de convergencia para todas las variables analizadas de 10^{-6} (Gromke et al., 2008).

Dominio computacional y condiciones de frontera

Con el fin de permitir el desarrollo adecuado de los procesos físicos estudiados dentro de la capa límite atmosférica, se generó un gran dominio computacional (250 m y 50 m para los ejes x-y, respectivamente), dicho dominio que incluía el invernadero estudiado se construyó siguiendo los parámetros recomendados por Etheridge (2011). Se usó una grilla no estructural para dividir el dominio computacional en un total de 462,967 elementos cuadrados, la grilla se refinó en la zona de cubierta, el suelo y las áreas de ventilación que son zonas donde se espera que se presenten gradientes térmicos y de velocidad significativa (Figura 3). Este número de elementos se obtuvo luego de realizar una prueba de independencia de la solución al tamaño de la grilla siguiendo el procedimiento realizado por He et al. (2017). La calidad de la grilla numérica fue evaluada mediante el determinante relativo 2X2, el cual mostró un comportamiento superior al 99,85 % con celdas entre 0,95 y 1, lo que indica un elemento de malla perfectamente regular, adicionalmente se evaluó el factor de asimetría, donde un 93,8 % de los volúmenes activos exhibió un valor dentro del rango de 0-0,25, considerado de excelente calidad (ANSYS, 2017; Baeza et al., 2017).

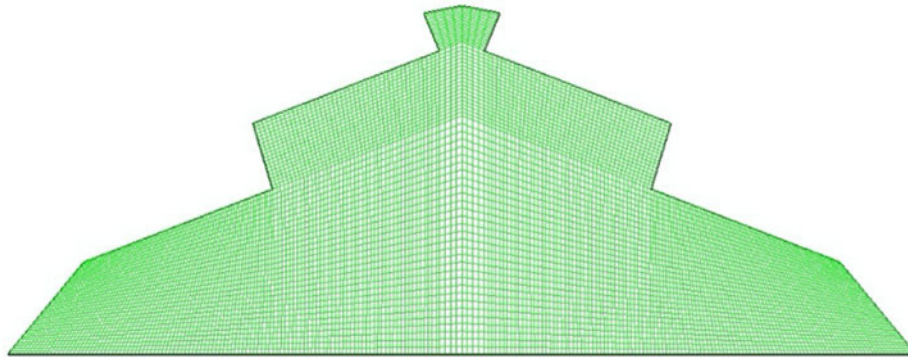


Figura 3. Detalle del mallado del perfil transversal del invernadero cubierta plana construido y evaluado el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Figure 3. Detail of the screen of the cross-sectional profile of the flat roof greenhouse built and evaluated by the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

El modelo numérico consideró las características atmosféricas del sitio experimental, tales como, la fuerza de la gravedad, la viscosidad del aire y la presión atmosférica. La condición límite de simetría fue impuesta en el borde superior del dominio computacional con el fin de describir las gradientes de todas las variables estudiadas y la velocidad normal a un plano de simetría. En las regiones sólidas del dominio computacional como son el suelo, la estructura del invernadero se estableció la condición de contorno de tipo pared antideslizante, las propiedades de polietileno y del suelo agrícola, como conductividad térmica (k), calor específico (C_p) y densidad (ρ), fueron establecidas de acuerdo con el estudio desarrollado por Villagrán et al. (2012). La condición de entrada de aire que para este estudio se estableció en el borde izquierdo del dominio computacional permitió simular las direcciones de viento dominantes que impactan de forma perpendicular a las aberturas de ventilación de la pared lateral y techo para los modelos bidimensionales, lo que han demostrado y generado una solución precisa y ágil en el estudio de ventilación natural de ambientes protegidos.

A este borde de entrada de aire se le estableció un perfil logarítmico de viento acoplado al modelo numérico CFD mediante una función definida de usuario (UDF) (Saberian y Sajadiye, 2019), calculado mediante ecuación 7 que describe el perfil logarítmico de velocidad de viento característico en la naturaleza.

$$V_2 = V_1 \frac{\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (7)$$

Donde V_1 es la velocidad de viento medida en una altura h_1 ; V_2 es la velocidad del viento calculada para una altura h_2 y z_0 es la longitud del coeficiente de rugosidad expresado en metros, valor que esta en función del tipo de superficie de los alrededores del invernadero, para este caso se consideró un valor de 0,1 que es usado para terrenos agrícolas (Bañuelos-Ruedas et al., 2010). El borde derecho del dominio se estableció como límite de salida de aire con una condición de contorno de salida de presión.

Para las áreas de ventilación, y de acuerdo con el escenario simulado, se les impuso una condición de medio poroso, con la presencia de dos tipos de malla M1 (número de hilos por cm 16,1 x 10,2) y M2 (número de hilos por cm 22,5 x 11,0) y los valores del coeficiente de pérdida inercial (C_2) y la permeabilidad (α), con base en los empleados en el trabajo de Flores-Velazquez y Montero (2008). Estas mallas estudiadas se seleccionaron en función de la disponibilidad existente a nivel comercial en la región de estudio y a su vez, porque son mallas con una densidad que permiten un mayor control de la entrada de insectos a los invernaderos.

Simulaciones numéricas y calibración del modelo de la dinámica de fluidos computacionales (CFD)

Para la validación del modelo que se realizó en el periodo comprendido entre el 26 de noviembre y el 21 de diciembre de 2019, se desarrolló un proceso experimental que incluía el registro de variables climáticas en el ambiente exterior del invernadero como, temperatura, humedad del aire, velocidad y dirección del viento, radiación solar, mediante una estación meteorológica Davis-Vantage 2 plus 6162 (Davis Instruments, Hayward, CA, EE. UU). En el interior del invernadero sobre la sección transversal (eje X), a una altura de a 1,7 m sobre el nivel del suelo (eje Y), se distribuyeron uniformemente cinco micro estaciones meteorológicas de la serie WatchDog 1000 (Spectrum Technologies, Aurora, IL), las cuales se utilizaron para registrar y almacenar los valores de temperatura (IC) y humedad relativa (%). Tanto en el exterior como en el interior la frecuencia de medición y el registro de datos fue cada 10 min durante el periodo de medición.

Los datos obtenidos durante el periodo de medición se analizaron en la hora 13, lo que permitió desarrollar una simulación cuando el viento era casi perpendicular al eje longitudinal del invernadero, esta simulación se realizó con la presencia de la malla M2 y con valores de temperatura de 33,6 °C, humedad relativa del 59,8 %, radiación solar de 695,1 W m⁻² y con una velocidad de viento exterior de 1,26 m s⁻¹; una vez culminada la simulación se realizó el postproceso extrayendo los datos de temperatura y humedad relativa del aire interior en los puntos x, y que coincidían con los puntos internos de muestreo, los datos obtenidos por medio de simulación y experimentación se compararon a través del cálculo del error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mediante las ecuaciones 8 y 9, respectivamente.

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |D_{mi} - D_{si}| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m |D_{mi} - D_{si}|^2}{m}} \quad (9)$$

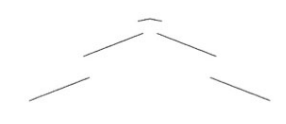
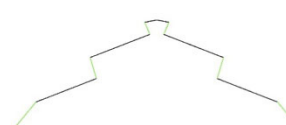
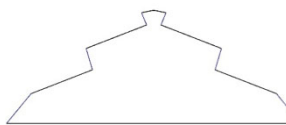
Donde D_{mi} y D_{si} , son el valor del dato observado y el valor del dato simulado, respectivamente, y m el número de datos comparados.

Escenarios considerados

Las simulaciones numéricas de los flujos de aire se realizaron para tres escenarios específicos (S1, S2, S3), donde S1 es el escenario sin presencia de mallas anti-insecto en las áreas de ventilación, S2 y S3 corresponden a la presencia de las mallas anti-insecto M1 y M2, respectivamente (Cuadro 1). Adicionalmente se evaluaron cinco valores de velocidad de viento exterior V1 a V5 (0,2, 0,5, 1,0, 2,0 y 5,0 $m\ s^{-1}$). La temperatura, la humedad relativa y la radiación, seleccionadas como condiciones iniciales correspondieron a los valores críticos diarios en la zona de estudio, sus valores fueron de 34,8 °C, 65 % y 850 $W\ m^{-2}$, respectivamente y se mantuvieron constantes en cada caso simulado.

Cuadro 1. Escenarios simulados del invernadero cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Table 1. Simulated scenarios of the flat roof greenhouse built at the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Escenario*	Velocidad del viento ($m\ s^{-1}$)	Tipo de Malla**	Configuración de simulación →
S1V1	0,2	Sin presencia de malla	
S1V2	0,5		
S1V3	1,0		
S1V4	2,0		
S1V5	5,0		
S2V1	0,2	Malla 1	
S2V2	0,5		
S2V3	1,0		
S2V4	2,0		
S2V5	5,0		
S3V1	0,2	Malla 2	
S3V2	0,5		
S3V3	1,0		
S3V4	2,0		
S3V5	5,0		

*S1: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V2: velocidad 2, V3: velocidad 3, V4: velocidad 4, V5: velocidad 5,
** Malla 1: 16,1 x 10,2 hilos por cm, Malla 2: 22,5 x 11,0 hilos por cm / SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V2: velocity 2, V3: velocity 3, V4: velocity 4, V5: velocity 5, ** Mesh 1: 16.1 x 10.2 threads per cm, Mesh 2: 22.5 x 11.0 threads per cm.

Resultados

Validación del modelo

En general, se observó que el modelo subestimó los valores temperatura y sobreestimó los valores de humedad relativa, aunque se debe resaltar que el comportamiento espacial en el eje transversal del invernadero exhibió una tendencia similar (Figura 4). Los valores de bondad de ajuste MAE y RMSE obtenidos para la temperatura fueron de 0,15 y 0,32 °C, mientras que para la humedad relativa se obtuvo valores 2,41 y 2,73 %, respectivamente.

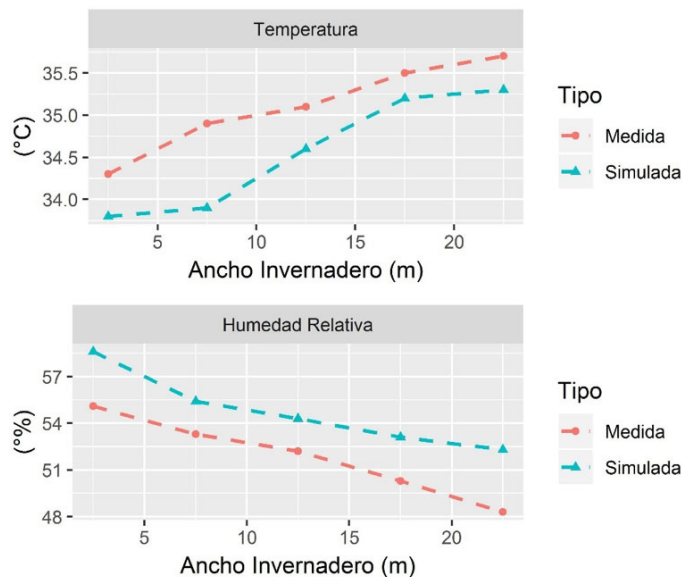


Figura 4. Perfiles de temperatura (°C) y humedad relativa (%) simulados y medidos en el invernadero cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribía de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Figure 4. Simulated and measured temperature (°C) and relative humidity (%) profiles in the flat roof greenhouse built at the Caribía Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Flujo de aire y tasas de ventilación

Las características cualitativas del flujo de aire generado en el interior del invernadero para los tres escenarios simulados S1, S2 y S3, presentaron patrones diferenciados a partir de la presencia y tipo de malla usada en las áreas de ventilación, esto repercutió directamente sobre la característica y la velocidad de los patrones de flujo. Para las simulaciones del escenario S1 se observaron flujos de aire que ingresaron al invernadero a través de las ventilaciones dispuestas en el costado de barlovento, se desplazaron por el área transversal del invernadero y salieron a través de las ventilaciones del costado de sotavento, por otro lado, para los escenarios S2 y S3 se observaron unos patrones de flujo que generaron unas células de movimientos convectivos entre la zona del suelo y la cubierta del invernadero, a excepción de los casos simulados de alta velocidad S2V5 y S3V5, los cuales presentaron características similares a S1 (Figura 5).

Los valores de velocidad media obtenidos en el interior del invernadero en un perfil transversal a una altura de 1,7 m para el escenario S1 variaron entre 0,251 y 4,011 ms^{-1} , mientras que para el escenario S2 entre 0,165 y

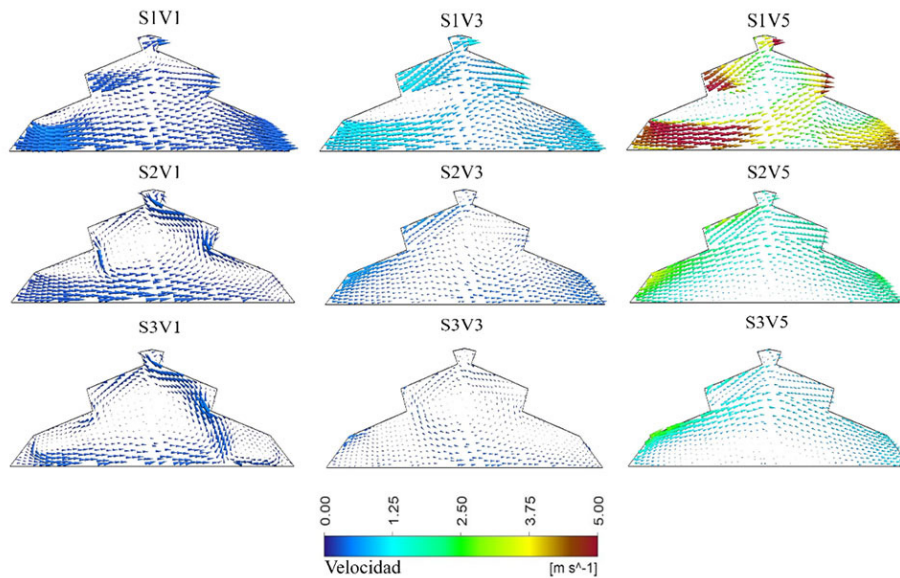


Figura 5. Patrones de flujo de aire ($m s^{-1}$) simulados en el invernadero de cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V3: velocidad 3, V5: velocidad 5.

Figure 5. Simulated airflow patterns ($m s^{-1}$) in the flat roof greenhouse built at the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V3: velocity 3, V5: velocity 5.

1,361 ms^{-1} y para S3 entre 0,124 y 0,493 $m s^{-1}$ (Cuadro 2). En términos generales, existió una reducción media de la velocidad de los flujos de aire con un valor de 55,8 y 74,3 % para S2 y S3, respectivamente, en comparación con los valores obtenidos en S1.

Se calcularon las velocidades normalizadas V_n (velocidad de aire interior/velocidad de aire exterior) en el perfil transversal del invernadero estudiado, con lo cual se pudo observar que para el patrón que presentó un comportamiento diferencial a la tendencia de los escenarios simulados fue el caso de baja velocidad V1 (Figura 6).

Cuadro 2. Valores de velocidad media calculada para cada escenario simulado en el invernadero cubierta plana el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Table 2. Average speed values calculated for each simulated scenario in the flat-covered greenhouse of the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Escenario*	Velocidad (ms^{-1})	Escenario	Velocidad (ms^{-1})	Escenario	Velocidad (ms^{-1})
S1V1	0,251	S2V1	0,165	S3V1	0,124
S1V2	0,413	S2V2	0,216	S3V2	0,145
S1V3	0,728	S2V3	0,276	S3V3	0,149
S1V4	1,601	S2V4	0,495	S3V4	0,174
S1V5	4,011	S2V5	1,361	S3V5	0,493

*SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V2: velocidad 2, V3: velocidad 3, V4: velocidad 4, V5: velocidad 5 / SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V2: velocity 2, V3: velocity 3, V4: velocity 4, V5: velocity 5.

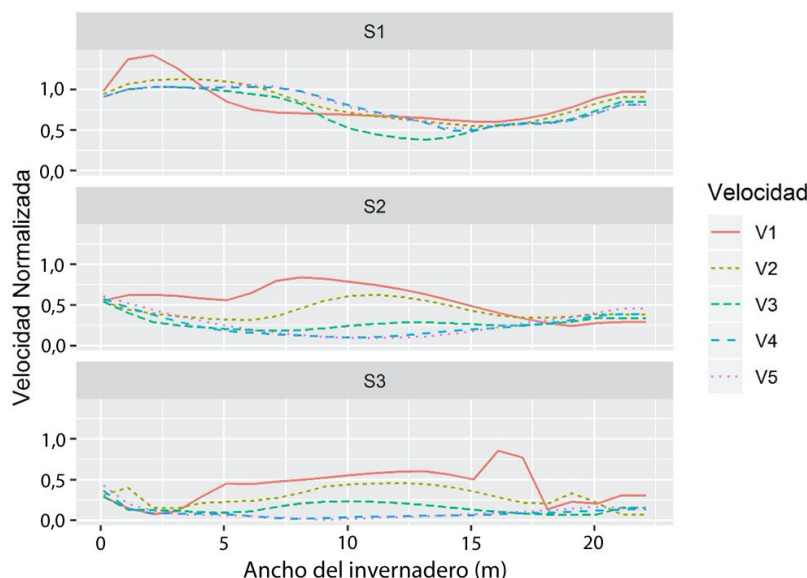


Figura 6. Perfiles de velocidad normalizada para los escenarios simulados en el invernadero cubierta plana construido el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

S1: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V2: velocidad 2, V3: velocidad 3, V4: velocidad 4 y V5: velocidad 5.

Figure 6. Normalized velocity profiles for the simulated scenarios in the flat roof greenhouse built by the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

S1: scenario 1, S2: scenario 2, S3: scenario 3, V1: velocity 1, V2: velocity 2, V3: velocity 3, V4: velocity 4 and V5: velocity 5.

Las tasas de ventilación por unidad de superficie cubierta (Φ , $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) para cada configuración evaluada mostraron que los valores de Φ más elevados se obtuvieron en el escenario S1, donde el valor fluctuó para las velocidades V1 y V5 entre 0,074 y 0,919 $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, mientras que para el escenario S2 los valores fluctuaron entre 0,038 y 0,552 $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y para S3 variaron entre 0,027 y 0,346 $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Figura 7).

Comportamiento térmico

En general, existió una relación entre la velocidad del viento exterior y el valor de la temperatura en el interior del invernadero, donde a mayor velocidad de viento menor valor de temperatura interna; asimismo la presencia de las mallas anti-insecto M1 y M2 generaron un aumento de la temperatura interna del invernadero (Figura 8).

Los valores de temperatura media más bajos se obtuvieron para el escenario S1, donde este valor osciló entre 35,86 y 34,82 °C para V1 y V5, respectivamente, mientras que para estas mismas velocidades en S2 se obtuvieron valores más elevados, de 0,74 y 0,27 °C y para S3 3,05 y 0,58 °C, respectivamente (Cuadro 3). La homogeneidad del comportamiento térmico evaluada como la variación del valor de la temperatura entre puntos opuestos del invernadero exhibió valores inferiores a 0,5 °C para las velocidades de flujo de aire exterior superiores a 2 m s^{-1} V3 y V5 en cada uno de los tres escenarios simulados.

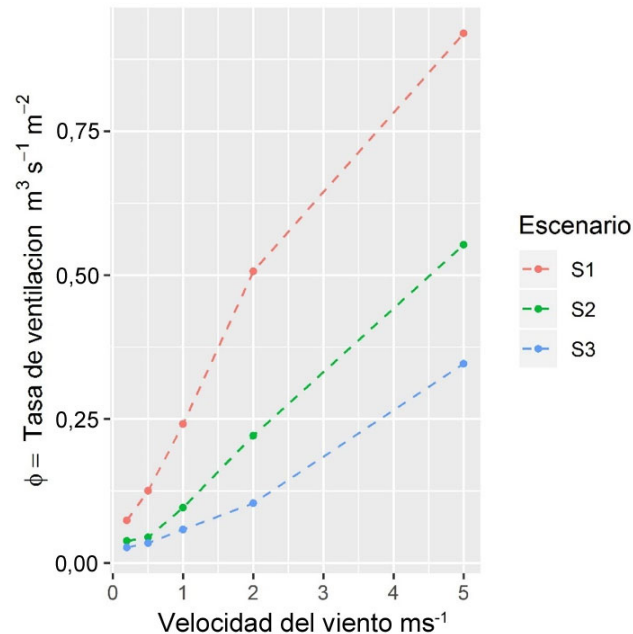


Figura 7. Tasa de ventilación Φ ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) calculada para cada uno de los escenarios simulados en el invernadero cubierta plana construido el Centro de Investigación Caribía de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

S1: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3.

Figure 7. Ventilation rate Φ ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) calculated for each of the simulated scenarios in the flat roof greenhouse built by the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

S1: scenario 1, S2: scenario 2, S3: scenario 3.

Comportamiento de la humedad relativa

Los patrones de distribución de la humedad relativa encontrados para los escenarios simulados mostraron un ambiente con valores de humedad heterogéneos para los escenarios S1V1, S2V1, S3V1 y S3V3, a su vez estos escenarios fueron los de baja velocidad y alta heterogeneidad térmica (Figura 9).

Los valores de humedad relativa media (HRm) oscilaron entre 52,1 y 64,9 %, los valores de la gradiente de humedad relativa (ΔHR) en el interior del invernadero fueron inferiores al valor del ambiente exterior en todos los casos y la homogeneidad de la distribución del vapor de agua en el aire fue evidente en los casos de alta velocidad de aire exterior V4 y V5 (Cuadro 4).

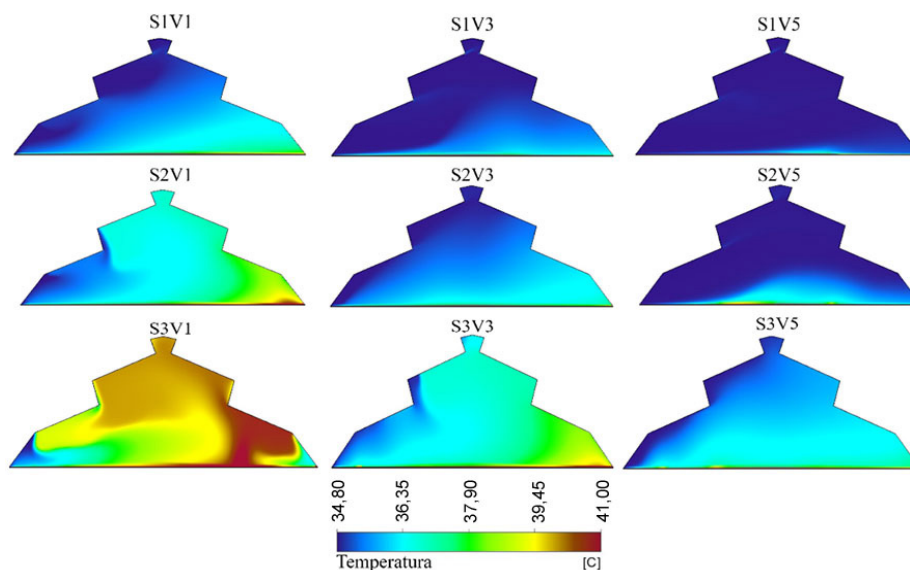


Figura 8. Patrones de distribución térmica (°C) simulados en el invernadero cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V3: velocidad 3, V5: velocidad 5.

Figure 8. Simulated temperature distribution patterns (°C) in the flat roof greenhouse built at the Caribia Research Center of the Corporacion Colombia de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V3: velocity 3, V5: velocity 5.

Cuadro 3. Parámetros térmicos obtenidos de cada escenario simulado en el invernadero cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Table 3. Thermal parameters obtained from each simulated scenario in the flat roof greenhouse built at the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA) Magdalena, Colombia, 2019.

Escenario*	Tm (°C)	ΔTm (°C)	SD- ΔTm (°C)
S1V1	35,86	1,087	0,648
S1V2	35,44	0,666	0,477
S1V3	35,15	0,378	0,303
S1V4	34,87	0,095	0,099
S1V5	34,82	0,041	0,033
S2V1	36,6	1,826	1,196
S2V2	36,08	1,300	0,693
S2V3	35,75	0,975	0,455
S2V4	35,46	0,683	0,377
S2V5	35,09	0,31	0,299
S3V1	38,91	4,134	1,296
S3V2	38,34	3,564	1,294
S3V3	36,89	2,110	1,053
S3V4	36,14	1,367	0,489
S3V5	35,4	0,629	0,276

Tm: temperatura media; ΔTm : gradiente térmico generado entre el ambiente interior del invernadero y el ambiente exterior; SD- ΔTm : desviaciones estándar de ΔTm / Tm: average temperature; ΔTm : thermal gradient generated between the indoor environment of the greenhouse and the outdoor environment; SD- ΔTm : standard deviation of ΔTm .

**SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V2: velocidad 2, V3: velocidad 3, V4: velocidad 4, V5: velocidad 5 / SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V2: velocity 2, V3: velocity 3, V4: velocity 4, V5: velocity 5.

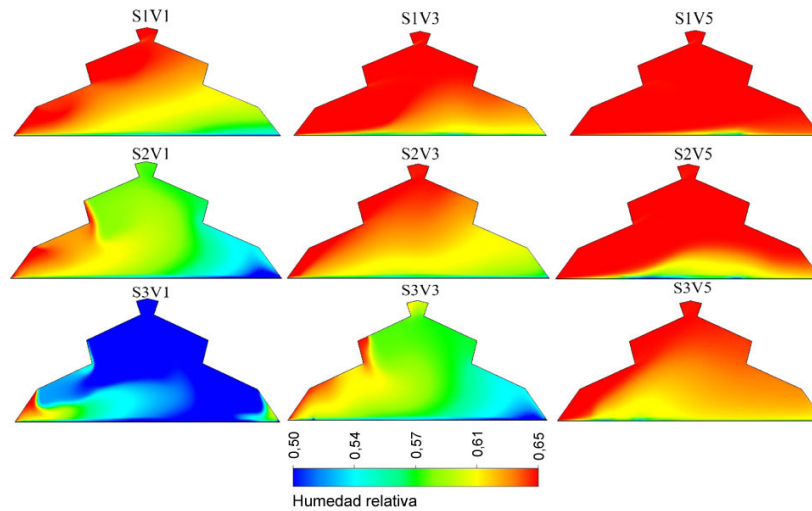


Figura 9. Patrones de distribución espacial de humedad relativa simulados en el invernadero cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

*SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V3: velocidad 3, V5: velocidad 5.

Figure 9. Spatial distribution patterns of relative humidity simulated in the flat roof greenhouse built at the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V3: velocity 3, V5: velocity 5.

Cuadro 4. Parámetros de humedad relativa obtenidos de cada escenario simulado en el invernadero cubierta plana construido en el Centro de Investigación Caribia de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Table 4. Relative humidity parameters obtained from each simulated scenario in the flat roof greenhouse built at the Caribia Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Magdalena, Colombia, 2019.

Escenario*	HRm(%)	Δ HR (%)	SD- Δ HR (°%)
S1V1	61,3	-3,7	22
S1V2	62,8	-2,2	16
S1V3	63,8	-1,2	1
S1V4	64,8	-0,2	0,3
S1V5	64,9	-0,1	0,1
S2V1	59	-6,0	3,8
S2V2	60,7	-4,3	2,3
S2V3	61,7	-3,3	1,5
S2V4	62,7	-2,3	1,3
S2V5	64	-1,0	1
S3V1	52,1	-12,9	3,7
S3V2	53,7	-11,3	3,8
S3V3	58,1	-6,9	3,3
S3V4	60,4	-4,6	1,6
S3V5	62,9	-2,1	0,9

HRm: humedad relativa media; Δ HR: gradiente de humedad relativa generado entre el ambiente interior del invernadero y el ambiente exterior; SD- Δ HR: desviaciones estándar de Δ HR / HRm: Average relative humidity; Δ HR: relative humidity gradient generated between the indoor environment of the greenhouse and the outdoor environment; SD- Δ HR: standard deviation of Δ HR.

*SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocidad 1, V2: velocidad 2, V3: velocidad 3, V4: velocidad 4, V5: velocidad 5. / SI: escenario 1, S2: escenario 2, S3: escenario 3, V1: velocity 1, V2: velocity 2, V3: velocity 3, V4: velocity 4, V5: velocity 5.

Discusión

En relación con los resultados encontrados en el modelo de dinámica de fluidos computacionales (CFD), se puede mencionar que los parámetros de bondad de ajuste obtenidos fueron similares a los reportados en la literatura de investigaciones donde se implementó un enfoque metodológico como el desarrollo en este trabajo de investigación. Los valores de MAE y RMSE fueron similares a los reportados por Villagrán y Bojacá (2019c) en un estudio de ventilación natural de un invernadero multi-túnel, asimismo, estos valores estuvieron en el rango recomendado para estudios de modelado y simulación de microclima en invernadero (Baptista et al., 2008), por lo tanto, se puede inferir que el modelo numérico utilizado en esta investigación fue válido para el estudio de las tasas de ventilación y su efecto sobre el microclima del invernadero analizado.

El comportamiento de los parámetros de flujo obtenidos en el escenario S1 para todas las velocidades analizadas, exhibió un comportamiento característico de un invernadero ventilado naturalmente y equipado con áreas de ventilación lateral y de techo.

Se observó que para los escenarios S1V1, S1V2 y S1V3 existió una fuerte influencia del componente térmico del fenómeno de ventilación natural, componente que impulsa la salida de aire del invernadero en función de los cambios de densidad del aire, por efecto del cambio de temperatura (Katsoulas et al., 2006). Para S1V4 y S1V5 dominó el componente eólico de la ventilación, el cual promovió el movimiento y posterior renovación de aire a través de cambios de presión e impulso desde las ventilaciones de barlovento hacia las ventilaciones de sotavento, este tipo de velocidades generaron tasas de ventilación que se comportaron de manera lineal con el aumento de la velocidad de aire exterior, lo cual, coincidió con lo reportado por Teitel et al. (2008) y Teitel y Wenger (2014).

En los escenarios S2 y S3 se observó una fuerte reducción del flujo de aire, donde la velocidad en el interior del invernadero se redujo en valores superiores al 50 % respecto a la velocidad de viento exterior, esta pérdida de flujo ocasionada por una fuerte caída de presión fue generada por la pantalla anti-insecto, que a su vez limitó el flujo, lo cual, ya se había reportado previamente con valores de hasta 80 % (Flores-Velazquez y Montero, 2008). La reducción promedio de las tasas de ventilación entre los escenarios fue de 55,3 y 77,1 % para S2 y S3, respectivamente en comparación con S1, con valores inferiores a los encontrados por Baeza et al. (2009) quienes reportaron reducciones del 77 y 87 %, la diferencia entre estos estudios estuvo influenciada por el tipo de malla, tamaño de invernaderos y superficies de ventilación, parámetros que difirieron en las dos investigaciones.

Los campos de distribución espacial de la temperatura mostraron una dependencia a las características del flujo de aire del ambiente exterior, generalmente en los invernaderos pasivos, las zonas más frescas del ambiente interior coinciden con las zonas de entrada de aire exterior (Baeza et al., 2017) y la temperatura del ambiente interior tiene una relación inversa con las tasas de ventilación, es decir en la medida que incrementa las tasas de ventilación disminuirá la temperatura al interior de la estructura (Ruiz-García et al., 2015).

Los resultados obtenidos mostraron que una condición crítica del valor y homogeneidad espacial de la temperatura se produciría bajo condiciones de baja velocidad del aire exterior y la presencia de una pantalla anti-insecto de baja porosidad S3V1 y S3V2, donde el valor de ΔT_m y $SD-\Delta T_m$ serían de $4,134 \pm 1,296$ °C y $3,564 \pm 1,294$ °C, respectivamente, estos aumentos de temperatura y heterogeneidad se debieron a la reducción significativa de la tasa de ventilación en estos escenarios (Campen, 2005; Romero-Gómez et al., 2010).

Otra de las variables que mostró un comportamiento relacionado con los patrones de flujo de aire fue la humedad relativa, en donde hubo una reducción del valor de este parámetro en comparación con el ambiente exterior, esto ocurrió ya que el invernadero se simuló sin la presencia de cultivo y no existió un aporte de humedad por transpiración o aplicación de riego, por lo tanto, la variación espacial de la humedad relativa quedó influenciada por la variación de la temperatura, es decir, las áreas con alta temperatura presentaron menores valores de humedad relativa y viceversa.

En el escenario S1 se encontró que los valores de humedad variaron entre 61,3 y 64,9 % para S1V1 y S1V5, respectivamente, a su vez este escenario presentó un comportamiento homogéneo de la humedad relativa con valores de SD- Δ HR entre 0,1 y 2,2 %, por el contrario en el escenario S3 para S3V1 y S3V2 se obtuvieron valores de humedad relativa de 52,1 y 53,7 % y los valores de SD- Δ HR fueron de 3,7 y 3,8 %, estos escenarios fueron a su vez, los que mayor gradiente y heterogeneidad térmica presentaron, lo cual confirma que estos parámetros están influenciados por las bajas tasas de ventilación producidas bajo estas condiciones de simulación, resultados que concuerdan con los reportados por Villagran y Bojacá (2019c) y He et al. (2015).

En condiciones de velocidades menores a 2 m s^{-1} la presencia de mallas anti-insecto podría generar tasas de ventilación menores que las necesarias para la producción agrícola, ya que la heterogeneidad de las variables como la temperatura y la humedad relativa limitan el crecimiento de las plantas y pueden inducir problemas de plagas y enfermedades (Piscia et al., 2012a;b).

Conclusiones

El estudio de los patrones de flujo de aire y las tasas de ventilación generadas en el interior del invernadero en los escenarios S2 y S3 con el uso de las áreas de ventilación con las mallas anti-insecto M1 y M2 (M1 número de hilos por cm 16,1 x 10,2 y M2 número de hilos por cm 22,5 x 11,0), permitió identificar una pérdida de impulso del flujo de aire a causa de una caída de presión generada por las mallas porosas, lo cual se tradujo en pérdidas de velocidad del flujo de aire en el interior del invernadero con 55,8 y 74,3 % para estos escenarios respecto al escenario S1. Esta pérdida de velocidad del flujo del aire produjo una reducción sobre las tasas de ventilación en S2 entre 40 y 48,7 % y en S3 entre 64 y 72,4 % respecto a S1 (escenario sin presencia de mallas anti-insecto en las áreas de ventilación), lo que permitió comprobar que las mallas anti-insecto con mayor número de hilos y menor porosidad generaron una mayor reducción de las tasas de ventilación.

El efecto sobre el microclima generado en el interior del invernadero fue crítico para los escenarios de velocidades menores a 2 m s^{-1} , por lo tanto, se recomienda que antes de seleccionar e implementar algún tipo de malla anti-insecto se evalúen las condiciones dominantes de velocidad y dirección del viento para las horas críticas del periodo diurno, esto con el objetivo de garantizar la generación de un microclima adecuado y homogéneo para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por el apoyo técnico y administrativo en este estudio, y al Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO) por la financiación de la investigación. Las opiniones expresadas en esta publicación son únicamente las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de FONTAGRO, su Consejo de Administración, el Banco, sus instituciones patrocinadoras o los países que representa.

Literatura citada

ANSYS. 2017. ANSYS fluent Software: CFD simulation. ANSYS: 1 User Manual, release 18.1. ANSYS Inc, Canonsburg, PA, USA.

- Baeza, E.J., J.J. Pérez-Parra, J.I. Montero, B.J. Bailey, J.C. López, and J.C. Gázquez. 2009. Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics. *Biosyst. Eng.* 10:86-96. doi:10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2009.04.008
- Baeza, E.J., A. Sapounas, C. Stanghellini, S. Bonachela, J. Hernández, J.I. Montero, J.C. López, M.R. Granados, P. Muñoz, P. Lorenzo, and P. Fernández-del-Olmo. 2017. Numerical simulation of the effect of different mulches on the heat storage capacity of a Mediterranean greenhouse soil. *Acta Hortic.* 1170:119-128. doi:10.17660/ActaHortic.2017.1170.13
- Bañuelos-Ruedas, F., C. Angeles-Camacho, and S. Rios-Marcuello. 2010. Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14:2383-2391. doi:10.1016/j.rser.2010.05.001
- Baptista, F.J., B.J. Bailey, and J.F. Meneses. 2008. Comparison of humidity conditions in unheated tomato greenhouses with different natural ventilation management and implications for climate and *Botrytis cinerea* control. *Acta Hortic.* 803:1013-1020. doi:10.17660/ActaHortic.2008.801.120
- Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas. 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Comput. Electron. Agric.* 34:207-221. doi:10.1016/S0168-1699(01)00188-0
- Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosyst. Eng.* 88:479-490. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006
- Bournet, P.E., and T. Boulard. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74:195-217. doi:10.1016/j.compag.2010.08.007
- Campan, J.B. 2005. Greenhouse design applying CFD for Indonesian conditions. *Acta Hortic.* 691:419-424. doi:10.17660/ActaHortic.2005.691.50
- Chen, J., F. Xu, D. Tan, Z. Shen, L. Zhang, and Q. Ai. 2015. A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Appl. Energy* 141:106-118. doi:10.1016/J.APENERGY.2014.12.026
- Etheridge, D. 2011. *Natural ventilation of buildings: Theory, measurement and design.* John Wiley & Sons, Ltda., Hoboken, NJ, USA.
- Fatnassi, H., T. Boulard, and L. Bouriden. 2003. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agric. For. Meteorol.* 118:97-111. doi:10.1016/S0168-1923(03)00071-6
- Fatnassi, H., T. Boulard, C. Poncet, and M. Chave. 2006. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosyst. Eng.* 93:301-312. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.11.014
- Flores-Velazquez, J., and J.I. Montero. 2008. Computational fluid dynamics (CFD) study of large scale screenhouses. *Acta Hortic.* 797:117-122. doi:10.17660/ActaHortic.2008.797.14
- Flores-Velázquez, J., I.L. López-Cruz, E. Mejía-Sáenz, y J.I. Montero-Camacho. 2014. Evaluación del desempeño climático de un invernadero Batcenital del centro de México mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). *Agrociencia* 48(2):131-146.
- Gromke, C., R. Buccolieri, S. Di-Sabatino, and B. Ruck. 2008. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of CFD data with experimental data. *Atmos. Environ.* 42:8640-8650. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.019

- He, K.S., D.Y. Chen, L.J. Sun, Z.L. Liu, and Z.Y. Huang. 2015. The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses during summer and winter seasons. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mechanics* 9:399-410. doi:10.1080/19942060.2015.1061553
- He, X., J. Wang, S. Guo, J. Zhang, B. Wei, J. Sun, and S. Shu. 2017. Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Comput. Electron. Agric.* 49:16-25. doi:10.1016/j.compag.2017.10.001
- Katsoulas, N., T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier, and C. Kittas. 2006. Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation. *Biosyst. Eng.* 93:427-436. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.01.001
- Kim, R.W., S.W. Hong, I.B. Lee, and K.S. Kwon. 2017. Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 2: Application of the CFD model. *Biosyst. Eng.* 164:257-280. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.09.011
- Limtrakarn, W., P. Boonmongkol, A. Chompupoung, K. Rungpratephaworn, J. Kruenate, and P. Dechaumphai. 2012. Computational fluid dynamics modeling to improve natural flow rate and sweet pepper productivity in greenhouse. *Adv. Mechanical Eng.* 2012:158563. doi:10.1155/2012/158563
- López, A., F.D. Molina-Aiz, D.L. Valera, and A. Peña. 2016. Wind tunnel analysis of the airflow through insect-proof screens and comparison of their effect when installed in a mediterranean greenhouse. *Sensors (Basel)* 16(5):690. doi:10.3390/s16050690
- López, A., D.L. Valera, and F. Molina-Aiz. 2011. Sonic anemometry to measure natural ventilation in greenhouses. *Sensors (Basel)* 11:9820-9838. doi:10.3390/s111009820
- Majdoubi, H., T. Boulard, A. Hanafi, A. Bekkaoui, H. Fatnassi, H. Demrati, M. Nya, and L. Bouirden. 2007. Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. *Transac. ASABE* 50:641-650. doi:10.13031/2013.22653
- Mesmoudi, K., K.H. Meguallati, and P.E. Bournet. 2017. Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under semi-arid climate. *Heat Transf. - Asian Res.* 46:1294-1311. doi:10.1002/htj.21274
- Miguel, A.F. 1998. Airflow through porous screens: From theory to practical considerations. *Energy Build.* 28:63-69. doi:10.1016/S0378-7788(97)00065-0
- Molina-Aiz, F.D., D.L. Valera, and A.J. Álvarez. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* doi:10.1016/j.agrformet.2004.03.009
- Molina-Aiz, F.D., D.L. Valera, A.A. Peña, J.A. Gil, and A. López. 2009. A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. *Biosyst. Eng.* 104:224-242. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.06.013
- Muñoz, P., J.I. Montero, A. Antón, and F. Giuffrida. 1999. Effect of insect-proof screens and roof openings on greenhouse ventilation. *J. Agric. Eng. Res.* 73:171-178. doi:10.1006/jaer.1998.0404
- Nebballi, R., J.C. Roy, and T. Boulard. 2012. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renew. Energy* 43:111-129. doi:10.1016/j.renene.2011.12.003
- Norton, T., D.W. Sun, J. Grant, R. Fallon, and V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresour. Technol.* 98:2386-2414. doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025
- Pérez-Vega, C., J.A. Ramírez Arias, y I.L. López Cruz. 2016. Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de invernaderos en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7:493-506.

- Piscia, D., J.I. Montero, E. Baeza, and B.J. Bailey. 2012a. A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosyst. Eng.* 111:141-154. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006
- Piscia, D., J.I. Montero, M. Melé, J. Flores, J. Pérez-Parra, and E.J. Baeza. 2012b. A CFD model to study above roof shade and on roof shade of greenhouses. *Acta Hortic.* 952:133-140. doi:10.17660 / ActaHortic.2012.952.15
- Romero-Gómez, P., C.Y. Choi, and I.L. López-Cruz. 2010. Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central Mexico. *Agrociencia* 44(1):1-15.
- Ruiz-García, A., I.L. López-Cruz, R. Arteaga-Ramírez, y J.A. Ramírez-Arias. 2015. Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimadas mediante balance de energía. *Agrociencia* 49(1):87-100.
- Saberian, A., and S.M. Sajadiye. 2019. The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation. *Renew. Energy* doi:10.1016/j.renene.2019.01.108
- Santolini, E., B. Pulvirenti, D. Torreggiani, and P. Tassinari. 2019. Novel methodologies for the characterization of airflow properties of shading screens by means of wind-tunnel experiments and CFD numerical modeling. *Comput. Electron. Agric.* 163:104800. doi:10.1016/j.compag.2019.05.009
- Teitel, M., O. Liran, J. Tanny, and M. Barak. 2008. Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate. *Biosyst. Eng.* 101:111-122. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.05.012
- Teitel, M., and E. Wenger. 2014. Air exchange and ventilation efficiencies of a monospan greenhouse with one inflow and one outflow through longitudinal side openings. *Biosyst. Eng.* 119: 98-107. doi:10.1016/j.biosystemseng.2013.11.001
- Valera, D.L., A.J. Álvarez, and F.D. Molina. 2006. Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses. *Spanish J. Agric. Res.* 4:273-279. doi:10.5424/sjar/2006044-204
- Villagrán, E.A., E.J. Baeza Romero, and C.R. Bojacá. 2019. Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosyst. Eng.* 188:288-304. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026
- Villagrán, E.A., and C.R. Bojacá. 2019a. Effects of surrounding objects on the thermal performance of passively ventilated greenhouses. *J. Agric. Eng.* 856:20-27. doi:10.4081/jae.2019.856
- Villagrán, E.A., and C.R. Bojacá. 2019b. CFD simulation of the increase of the roof ventilation area in a traditional Colombian greenhouse: Effect on air flow patterns and thermal behavior. *Int. J. Heat Technol.* 37:881-892. doi:10.18280/ijht.370326
- Villagrán, E.A., and C.R. Bojacá. 2019c. Study of natural ventilation in a Gothic multi-tunnel greenhouse designed to produce rose (*Rosa spp.*) in the high-Andean tropic. *Ornamental Hortic.* 25:133-143. doi:10.14295/oh.v25i2.2013
- Villagrán, E.A., R. Gil, J.F. Acuña, and C.R. Bojacá. 2012. Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse. *Agron. Colomb.* 30:282-288.
- Villagrán-Munar, E.A., y C.R. Bojacá-Aldana. 2019. Simulación del microclima en un invernadero usado para la producción de rosas bajo condiciones de clima intertropical. *Chil. J. Agric. Anim. Sci.* 35:137-150. doi:10.4067/s0719-38902019005000308
- Wu, T., and C. Lei. 2016. CFD simulation of the thermal performance of an opaque water wall system for Australian climate. *Solar Energy* 133:141-154. doi:10.1016/J.SOLENER.2016.04.001