



Ingeniería agrícola y biosistemas

ISSN: 2007-3925

ISSN: 2007-4026

Universidad Autónoma Chapingo

Flores-Velázquez, Jorge; Vega-García, Manuel  
Regional management of the environment in a zenith greenhouse with computational fluid dynamics (CFD)  
Ingeniería agrícola y biosistemas, vol. 11, no. 1, 2019, January-June, pp. 3-20  
Universidad Autónoma Chapingo

DOI: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.04.007>

Available in: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688672144001>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's webpage in redalyc.org

UAEH  redalyc.org

Scientific Information System Redalyc  
Network of Scientific Journals from Latin America and the Caribbean, Spain and Portugal

Project academic non-profit, developed under the open access initiative

# Regional management of the environment in a zenith greenhouse with computational fluid dynamics (CFD)

## Gestión regional del ambiente en un invernadero cenital con dinámica de fluidos computacional (DFC)

Jorge Flores-Velázquez<sup>1\*</sup>; Manuel Vega-García<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Subcoordinación de Ingeniería de Riego. Paseo Cuauhnáhuac núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, MÉXICO.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

\*Corresponding author: [jorge\\_flores@tlaloc.imta.mx](mailto:jorge_flores@tlaloc.imta.mx)

### Abstract

**Introduction:** The ability to manipulate environmental conditions within a greenhouse allows production control; however, technological constraints still persist in these systems.

**Objective:** To model the environment of a zenith greenhouse cultivated with tomato using computational fluid dynamics (CFD), to propose environmental management alternatives and to estimate the energy expenditure and economic cost of using fans.

**Methodology:** The energy expenditure (kW·h<sup>-1</sup>) and cost (MXN) of using natural and mechanical ventilation in greenhouses were estimated based on climate data from municipalities in San Luis Potosí and the State of Mexico. The analysis inside the greenhouse was carried out with CFD and climatological normals. In addition, the ventilation rate and thermal gradients were estimated to infer a local climatic potential as a function of optimum tomato temperatures. In addition, the ventilation rate and thermal gradients were estimated to infer a local climatic potential as a function of optimum tomato temperatures.

**Results:** It was observed that in regions with mild summers, the use of mechanical ventilation combined with natural ventilation is a viable alternative by reducing temperature and energy costs. The 3D simulations carried out made it possible to have a detailed view of the spatial distribution of temperature and airflow inside the greenhouse.

**Study limitations:** The model only considers wind speed and temperature. To include other variables, it must be calibrated.

**Originality:** Ventilation rates (n = 35) and thermal gradients (3 K) were estimated using CFD to infer a regional climatic potential as a function of optimum tomato temperatures.

**Conclusions:** Combined ventilation reduces problems due to high temperatures in hours of maximum radiation, with no significant impact on production costs.

**Keywords:** mechanical ventilation, thermal potential, numerical model, microclimate.

### Resumen

**Introducción:** La habilidad de manipular las condiciones ambientales dentro de un invernadero permite controlar la producción; no obstante, aún persisten restricciones tecnológicas en estos sistemas.

**Objetivo:** Modelar el ambiente de un invernadero cenital cultivado con tomate mediante dinámica de fluidos computacional (DFC), para proponer alternativas de gestión ambiental y estimar el gasto energético y el costo económico por uso de ventiladores.

**Metodología:** Se estimó el gasto energético (kW·h<sup>-1</sup>) y el costo (MXN) del uso de ventilación natural y mecánica en invernaderos a partir de datos climáticos de municipios de San Luis Potosí y Estado de México. El análisis al interior del invernadero se realizó con DFC y normales climatológicas. Además, se estimó la tasa de ventilación y los gradientes térmicos para inferir un potencial climático local en función de las temperaturas óptimas del tomate.

**Resultados:** Se observó que en regiones con veranos suaves, el uso de ventilación mecánica combinada con natural es una alternativa viable al reducir la temperatura y el costo de energía. Las simulaciones 3D realizadas permitieron tener una visión detallada de la distribución espacial de temperatura y flujo del aire al interior del invernadero.

**Limitaciones del estudio:** El modelo únicamente contempla la velocidad del viento y la temperatura. Para incluir otras variables deberá ser calibrado.

**Originalidad:** Se estimaron las tasas de ventilación (n = 35) y gradientes térmicos (3 K) mediante CFD para inferir un potencial climático regional en función de las temperaturas óptimas del tomate.

**Conclusiones:** La ventilación combinada reduce los problemas por temperaturas altas en horas de máxima radiación, sin repercusiones significativas en los costos de producción.

**Palabras clave:** ventilación mecánica, potencial térmico, modelo numérico, microclima.



## Introduction

The expansion of protected agriculture has led to an increase in crop yields. To a great extent, this increase has been made possible by the capacity achieved in the management of climate variables, which allows optimal crop performance. Achieving this expansion implied the technological adaptation of the system, originally conceived under characteristics restrictive to practically any climatic condition. However, despite the achievements, technological constraints still persist in the implementation of this production system. The current situation requires a personalized management approach that deals with the interaction of the biosystem (physical-biological-environmental) (Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi, & Grisey, 2017; García-Martínez, Balasch, Alcon, & Fernández-Zamudio, 2010; Maher, Sami, & Hana, 2018; Piscia et al., 2012).

In Mexico, the area devoted to crop production in protected and semi-protected systems exceeds 30 000 ha, and continues to grow; however, due to the country's climatic diversity, it is still considered a risky activity due to environmental management issues, owing to the use of medium and low technology greenhouses (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2013). Despite these circumstances, the agricultural sector has been able to maintain crop production, thereby guaranteeing food to a logarithmically growing population (Moreno-Reséndez, Aguilar-Durón, & Luévano-González, 2011). The challenges are to make Mexican producers more competitive by transferring technology and to sustain it by increasing the protected agriculture area (Avendaño-Ruiz & Schwentesius-Rindermann, 2005).

The ability to manipulate environmental conditions within a greenhouse allows for production control, increased productivity and quality, and an extended growing period, which is not possible through traditional production systems (Hanan, 1998; van Straten & van Henten, 2010). However, greenhouse upgrading is dependent on climatic variations and the investment capacity of producers to acquire and use heating systems, air extractors, and automated irrigation and fertilization systems (Juárez-López et al., 2011). In addition, greenhouse production systems should be optimized, for which the presence of multiple factors in climate response and the inclusion of economic models must be taken into account (Hasselmann & Hasselmann, 1998).

A biological system transfers heat and mass, and within a greenhouse there are sources consuming heat, pollutants and water vapor (Rico-García, Castañeda-Mirada, García-Escalante, Lara-Herrera, & Herrera-Ruiz, 2007). In this sense, microclimate modeling has evolved with the use of subroutines or models that consider the biological

## Introducción

La expansión de la agricultura protegida ha permitido el incremento del rendimiento de los cultivos. En gran medida, dicho incremento ha sido posible por la capacidad lograda en el manejo de las variables climáticas, lo que permite un desempeño óptimo de los cultivos. Lograr esta expansión implicó la adaptación tecnológica del sistema, originalmente concebido bajo características restrictivas a prácticamente cualquier condición climática. No obstante, pese a los logros obtenidos, aún persisten restricciones tecnológicas en la implementación de este sistema de producción. La situación actual exige un manejo personalizado que atienda la interacción del biosistema (físico-biológico-ambiental) (Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi, & Grisey, 2017; García-Martínez, Balasch, Alcon, & Fernández-Zamudio, 2010; Maher, Sami, & Hana, 2018; Piscia et al., 2012).

En México, la superficie dedicada a la producción de cultivos en sistemas protegidos y semiprotegidos supera las 30 000 ha, y continúa creciendo; sin embargo, debido a la diversidad climática del país, aún se considera una actividad de riesgo por cuestiones de manejo ambiental, debido al uso de invernaderos de mediana y baja tecnología (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2013). A pesar de estas circunstancias, el sector agrícola ha sido capaz de mantener la producción de cultivos, y con ello garantizar los alimentos a una población logarítmicamente creciente (Moreno-Reséndez, Aguilar-Durón, & Luévano-González, 2011). Los retos son lograr mayor competitividad de los productores mexicanos con la transferencia de tecnología y sostener la tecnología con el incremento de la superficie de agricultura protegida (Avendaño-Ruiz & Schwentesius-Rindermann, 2005).

La habilidad de manipular las condiciones ambientales dentro de un invernadero permite controlar la producción, el aumento de la productividad y la calidad, así como el periodo de cultivo, lo cual no es posible mediante los sistemas de producción tradicionales (Hanan, 1998; van Straten & van Henten, 2010). Sin embargo, el acondicionamiento de los invernaderos es dependiente de las variaciones climáticas y la capacidad de inversión de los productores, pudiéndose emplear sistemas de calefacción, extractores de aire, y sistemas de riego y fertilización automatizados (Juárez-López et al., 2011). Además, se considera que los sistemas de producción en invernadero deben ser optimizados, para lo cual se debe tener en cuenta la presencia de múltiples factores en la respuesta climática y la inclusión de modelos económicos (Hasselmann & Hasselmann, 1998).

Un sistema biológico transfiere calor y masa, y dentro de un invernadero existen fuentes consumidoras de

system. According to Norton, Sun, Grant, Fallon, and Dodd (2007), these subroutines allow the modeling of plant transpiration, the production or consumption of CO<sub>2</sub> and the programming of boundary conditions. Flores-Velázquez and Villarreal-Guerrero (2015) mention that a routine for this type of modeling is, firstly, the calculation of the biosystem's inside temperature based on net solar energy, and secondly, the division of solar energy into convective and latent flows based on local conditions. The latter depends on heating and water vapor exchanges (stomata and aerodynamics) between the matrix of the porous medium and the air inside each mesh of the aboveground part of the crop (represented by a porous medium).

The aforementioned models allow obtaining more real and detailed results based on the biological response of the crops, for which it is necessary to consider their physical aspects, the use of climate control equipment in the greenhouse (Ito & Hattori, 2012; Montero et al., 2013; Piscia et al., 2012), the interaction of the climate considering the effect of evotranspiration (Bouhoun-Ali, Bournet, Danjou, Morille, & Migeon, 2014; Farber, Farber, Grabel, Krick, & Uberholz, 2017; Tamimi & Kacira, 2013), photosynthesis (Boulard et al., 2017; Roy, Pouillard, Boulard, Fatnassi, & Grisey, 2014) and stoma resistance (Bouhoun-Ali, Bournet, Cannavo, & Chantoiseau, 2017).

Over the past 20 years since its creation, a tool based on numerical methods for greenhouse climate management, known as computational fluid dynamics (CFD), has been constantly improved. This tool has brought significant results applicable to the development of the protected agriculture sector (Flores-Velázquez, Mejía-Saenz, Montero-Camacho, & Rojano, 2011; Norton et al., 2007).

One of the main problems facing passive greenhouse crop production is excess heat, which accumulates at specific times of the year and day. This implies that the accumulated radiation in the thermal infrared wavelength must be evacuated to optimize energy consumption (Shen, Wei, & Xu, 2018) and water consumption (Katsoulas, Sapounas, de Zwart, Dieleman, & Stanghellini, 2015). In this type of greenhouse, natural ventilation systems are used (opening and closing windows) to prevent the temperature from rising; however, it is possible that at times of maximum radiation it may be necessary to use an auxiliary ventilation system alone (Chia-Ren, Ting-Wei, Ren-Kai, Tso-Ren, & Chih-Kai, 2017; Flores-Velázquez & Villarreal, 2015) or combined (Flores-Velázquez, Montero, Baeza, & López, 2014).

There is a trend towards using agricultural production systems such as the greenhouse, plant factory and vertical farm, among others (Al-Kodmany, 2018; de Anda & Shear, 2017), in urban areas, so it is considered

calor, contaminantes y vapor de agua (Rico-García, Castañeda-Mirada, García-Escalante, Lara-Herrera, & Herrera-Ruiz, 2007). En este sentido, la modelación de microclimas ha evolucionado con la participación de subrutinas o modelos que consideran el sistema biológico. De acuerdo con Norton, Sun, Grant, Fallon, y Dodd (2007), estas subrutinas permiten el modelado de la transpiración de las plantas, la producción o consumo de CO<sub>2</sub> y la programación de condiciones de frontera. Flores-Velázquez y Villarreal-Guerrero (2015) mencionan que una rutina para este tipo de modelación es, primeramente, el cálculo de la temperatura interior del biosistema basado en la energía solar neta, y segundo, la división de la energía solar en los flujos convectivos y latentes en función de las condiciones locales. Esto último depende de la calefacción e intercambios de vapor de agua (estomas y aerodinámica) entre la matriz del medio poroso y el aire dentro de cada malla de la parte aérea del cultivo (representado por un medio poroso).

Los modelos mencionados permiten obtener resultados más reales y detallados en función de la respuesta biológica de los cultivos, para lo cual es necesario considerar aspectos físicos del cultivo, el uso de equipos para el control del clima en el invernadero (Ito & Hattori, 2012; Montero et al., 2013; Piscia et al., 2012), la interacción del clima considerando el efecto de la evotranspiración (Bouhoun-Ali, Bournet, Danjou, Morille, & Migeon, 2014; Farber, Farber, Grabel, Krick, & Uberholz, 2017; Tamimi & Kacira, 2013), la fotosíntesis (Boulard et al., 2017; Roy, Pouillard, Boulard, Fatnassi, & Grisey, 2014) y la resistencia de los estomas (Bouhoun-Ali, Bournet, Cannavo, & Chantoiseau, 2017).

En los últimos 20 años, se creó y ha evolucionado una herramienta basada en métodos numéricos para la gestión del clima en invernaderos, conocida como dinámica de fluidos computacional (DFC). Dicha herramienta ha traído significativos resultados aplicables al desarrollo del sector de agricultura protegida (Flores-Velázquez, Mejía-Saenz, Montero-Camacho, & Rojano, 2011; Norton et al., 2007).

Uno de los principales problemas que enfrenta la producción de cultivos en invernaderos pasivos es el exceso de calor, el cual se acumula en periodos específicos del año y del día. Lo anterior implica que la radiación acumulada en la longitud de onda del infrarrojo térmico debe ser evacuada para optimizar el consumo de energía (Shen, Wei, & Xu, 2018) y el consumo hídrico (Katsoulas, Sapounas, de Zwart, Dieleman, & Stanghellini, 2015). En este tipo de invernaderos, se emplean sistemas de ventilación natural (abriendo y cerrando ventanas) para evitar que aumente la temperatura; sin embargo, es posible que en los momentos de máxima radiación sea necesario el uso de un sistema auxiliar de ventilación solo (Chia-

necessary to quantify the cost of the non-subsidized domestic electricity tariff. This cost is estimated based on the operating time of the fans, which would be when the outside temperature exceeds 30 °C. Derived from this analysis, the results are extrapolated with data from local weather stations to analyze the operating cost of the fans by municipality.

Therefore, the aim of this work was to model the environment of a zenith greenhouse cultivated with tomato by means of CFD, to propose environmental management alternatives and to estimate the energy expenditure for the use of fans and the economic cost thereof with two commercial tariffs (domestic and agricultural).

Materials and methods

The greenhouse used for microclimate analysis and validation is located in the municipality of Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, Mexico, with coordinates 22° 13' 50'' LN and 100° 51' 35'' LW, at 1835 masl. The greenhouse structure has an approximate area of 1000 m<sup>2</sup> (Table 1), a translucent polyethylene cover and retractable curtains on each side, as well as in each overhead window.

The greenhouse was equipped with six probes (Vaisala HMP50, Campbell Scientific®, USA), of which five recorded the temperature and relative humidity inside the greenhouse (probes 1, 2, 3, 5 and 6). The wind speed and direction/solar radiation probe (probe 4) was placed on the ridge (outside the greenhouse), at 8 m high. This last one recorded the temperature and relative humidity outside the greenhouse. Of the probes placed inside the greenhouse, three were located in the center of each span. Probe 1 was placed in the span near the control cabin, probe 2 in the central span, and probe 3 in the opposite span (Figure 1).

Inside the greenhouse, ball-type red tomato (*Lycopersicon esculentum*) was cultivated, sown in a quincunx arrangement with a density of 4.4 plants·m<sup>2</sup>. Plants were distributed in 60-cm ridges, giving a total of 20 beds (seven beds in two of the spans and six in the other one), 1.8 m of corridor (from half bed to half bed, from the irrigation system strip) and 1.2 m of free space between ridges.

Ren, Ting-Wei, Ren-Kai, Tso-Ren, & Chih-Kai, 2017; Flores-Velázquez & Villarreal, 2015) o combinado (Flores-Velázquez, Montero, Baeza, & López, 2014).

Existe la tendencia de emplear sistemas de producción agrícola como el invernadero, *plant factory*, *vertical farm*, entre otros (Al-Kodmany, 2018; de Anda & Shear, 2017), en zonas urbanas, por lo que se considera necesario cuantificar el costo de la tarifa sin subsidio (domestica). Dicho costo se estima en función del tiempo de operación de los ventiladores, que sería cuando la temperatura exterior rebasa los 30 °C. Derivado de este análisis, se extrapolan los resultados con datos de estaciones climáticas locales para analizar el costo de operación de los ventiladores por municipio.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue modelar el ambiente de un invernadero cenital cultivado con tomate mediante DFC, para proponer alternativas de gestión ambiental y estimar el gasto energético por uso de ventiladores y el costo económico con dos tarifas comerciales (doméstica y agrícola).

Materiales y métodos

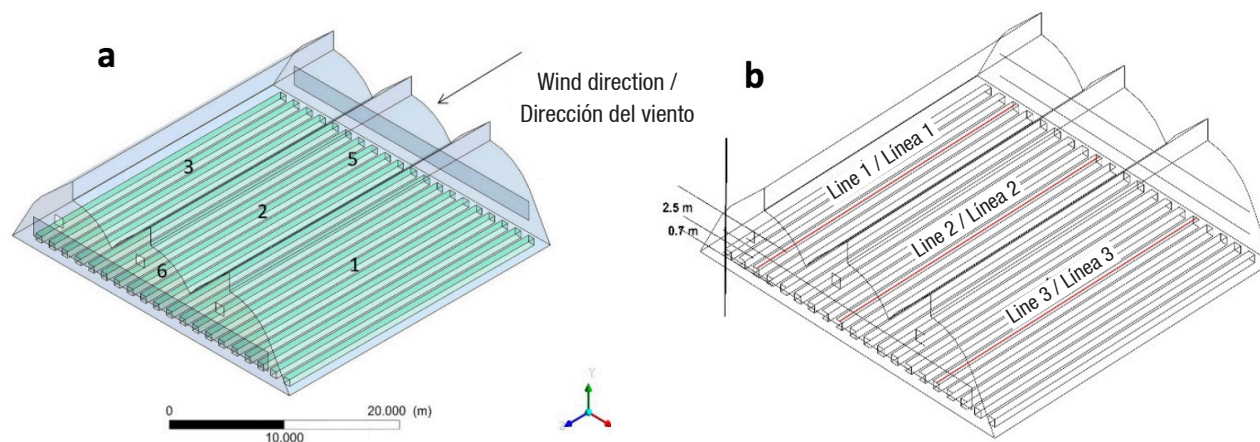
El invernadero empleado para el análisis micro climático y validación se encuentra localizado en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México, y sus coordenadas son 22° 13' 50'' de latitud norte y 100° 51' 35'' de longitud oeste, a 1835 msnm. La estructura del invernadero tiene un área aproximada de 1000 m<sup>2</sup> (Cuadro 1), su cobertura es de polietileno translucido y cuenta con cortinas retractables de cada lado, así como en cada ventana cenital.

Para medir la temperatura, el invernadero se equipó con seis sondas (Vaisala HMP50, Campbell Scientific®, EUA); de las cuales cinco registraron la temperatura y la humedad relativa dentro del invernadero (sondas 1, 2, 3, 5 y 6). La sonda de velocidad, dirección de viento y radiación solar (sonda 4), se colocó en el mástil (afuera del invernadero), a 8 m de altura. Esta última registró la temperatura y la humedad relativa fuera del invernadero. De las sondas colocadas dentro del invernadero, tres se ubicaron en el centro de cada capilla o nave. La sonda 1 se colocó en la capilla que está cerca de la cabina de controles, la 2 en la capilla central y la 3 en la capilla opuesta (Figura 1).

Table 1. Geometric dimensions of the computational model.  
Cuadro 1. Dimensiones de la geometría del modelo computacional.

Greenhouse dimensions (m)/ Dimensiones del invernadero (m)	Outside domain dimensions (m)/ Dimensiones del dominio exterior (m)	Crop area dimensions (m)/ Dimensiones de la zona de cultivo (m)
34 x 32 x 4.75	170 x 192 x 22.35	31 x 30 x 0.7





**Figure 1. a) Simulated greenhouse model and location of sensors and b) longitudinal profiles in the center of each span and plan view at two heights (0.7 and 2.5 m).**

**Figura 1. a) Modelo de invernadero simulado y ubicación de los sensores y b) perfiles longitudinales centro de cada nave y vista en planta a dos alturas (0.7 y 2.5 m).**

To validate the model, the environmental readings obtained from the instruments installed in the greenhouse were used. These readings were recorded and stored from 6:16 am on June 21, 2014 until 2:52 pm on July 19 of the same year. The data recorded were: temperature, relative humidity, wind speed and radiation, both inside and outside the greenhouse. The stored information was downloaded and then processed in Excel, Microsoft®, where a focus was made at two time intervals: from 12:30 pm to 2:30 pm as the warm period of the day, and from 4:30 am to 5:30 am as the cold period. The total averages of the variables recorded in each probe were obtained and then used to determine the model's initial conditions.

ANSYS® Fluent® software was used for the development and numerical simulation of the CFD model. As a previous phase, the geometry and mesh of the model were generated in which the boundary conditions were defined; for this purpose, the ventilation analysis was performed in three dimensions. The geometry, domain and mesh of the model were developed in ANSYS® Workbench, with Design Modeler and Meshing tools. Within the process, solution is given to the transport equations, which were discretized in algebraic equations and calculated by numerical methods.

The greenhouse was simulated by CFD, as well as the natural ventilation system, from which the inlet and outlet airflows are quantified. The inlet speed, as a boundary or starting condition, was established according to the wind speed values measured with the sensors installed. The space occupied by the crop was simulated and assigned porous medium properties.

Additionally, hypotheses were established regarding the configuration of the simulation, for which the

Dentro del invernadero, se cultivó tomate rojo (*Lycopersicum esculentum*) tipo bola, el cual se sembró a tresbolillo con densidad de 4.4 plantas·m<sup>-2</sup>. Las plantas se distribuyeron en camellones de 60 cm, lo que dio un total de 20 camas (siete camas en dos de las naves y seis en la otra nave), 1.8 m de pasillo (de mitad de cama a mitad de cama, a partir de la cintilla del sistema de riego) y 1.2 m de espacio libre entre camellones.

Para validar el modelo, se utilizaron las lecturas ambientales obtenidas del instrumental instalado en el invernadero. Dichas lecturas se registraron y almacenaron desde las 6:16 am del 21 de junio de 2014 hasta las 2:52 pm del 19 de julio del mismo año. Los datos registrados fueron: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación, tanto en el interior como en el exterior del invernadero. La información almacenada se descargó y posteriormente se procesó en Excel, Microsoft®, en donde se realizó un enfoque a dos intervalos de tiempo: de las 12:30 pm a las 2:30 pm como periodo cálido del día, y de las 4:30 am a las 5:30 am como el periodo frío. Se obtuvieron los promedios totales de las variables registradas en cada sonda, los cuales se utilizaron para determinar las condiciones iniciales del modelo.

Para el desarrollo y simulación numérica del modelo DFC se utilizó el programa ANSYS® Fluent®. Como fase previa, se generó la geometría y malla del modelo en la que se definieron las condiciones de frontera; para ello, el análisis de la ventilación se realizó en tres dimensiones. La geometría, el dominio y el mallado del modelo se elaboraron en ANSYS® Workbench, con herramientas de *Design Modeler* y *Meshing*. Dentro del proceso se da solución a las ecuaciones de transporte, las cuales se discretizan en ecuaciones algebraicas y se calculan mediante métodos numéricos.

conditions of the model and of the variables involved to obtain the solution were considered (Table 2).

The simulated scenarios consisted of a natural ventilation system in which the behavior of temperature, wind speed and its effect on the ventilation rate in the environment generated inside the greenhouse were described. In addition, an alternative for the management of high temperatures with natural ventilation in combination with mechanical ventilation was proposed and described (Table 3), and its use was evaluated based on the cost and time of operation in the day.

El invernadero se simuló mediante DFC, al igual que el sistema de ventilación natural, del cual se cuantifica los flujos de aire de entrada y salida. La velocidad de entrada, como condición de frontera o inicio, se estableció de acuerdo con los valores de velocidad del aire medidos con los sensores instalados. El espacio ocupado por el cultivo se simuló y se le asignaron propiedades de medio poroso.

Adicionalmente, se establecieron las hipótesis respecto a la configuración de la simulación, para lo cual se consideraron las condiciones del modelo y de las

**Table 2. Simulation hypothesis, contour characteristics and physical properties used as parameters in the model solution.**

**Cuadro 2. Hipótesis de simulación, características de contorno y propiedades físicas usadas como parámetros en la solución del modelo.**

Parameters/Parámetros	Hypothesis/Hipótesis
Physical properties/Propiedades físicas	
Solution/Solución	Segregated/Segregada 3D simulation/Simulación 3D Implicit formulation/Formulación implícita Absolute speed/Velocidad absoluta
Time condition/Condición de tiempo	Steady-state analysis (second order)/ Análisis de estado estacionario (segundo orden)
Viscosity model/Modelo de viscosidad	Standard k-ε (two equations)/Estándar k-ε (dos ecuaciones) Activated flotation effect/Efecto de flotación activado Standard wall treatment/Tratamiento estándar en las paredes
Energy equation/Ecuación de energía	Activated/Activada
Pore formulation/Formulación de poros	Surface speed/Velocidad superficial
Gradient option/Opción de los gradientes	Cell-based/Basado en la celda
Contour characteristics/Características de contorno	
Inlet domain/Dominio de entrada	Inlet speed: constant/Velocidad de entrada: constante <i>Momentum</i> : orthogonal to the boundary/ <i>Momentum</i> : ortogonal a la frontera Turbulence, intensity and increase in viscosity/ Turbulencia, intensidad e incremento en la viscosidad
Outlet domain/Dominio de salida	Outlet pressure: constant/Presión de salida: constante Zero pressure and same turbulence condition/ Presión cero y misma condición de turbulencia
Wind speed/Velocidad del viento	Profile: constant (m·s <sup>-1</sup> )/Perfil: constante (m·s <sup>-1</sup> )
Porous medium treatment/ Tratamiento de medios porosos	Mesh: Porous jump/Malla: <i>Porous jump</i> Crop: Porous zone/Cultivo: <i>Porous jump</i>
Heat source/Fuente de calor	Constant from the ground: Boussinesq's hypothesis/ Constante desde el suelo: hipótesis de Boussinesq Flotation effect on the activated turbulence model/ Efecto de flotación en el modelo de turbulencia activado

**Table 3. Model simulation scenario: natural ventilation.****Cuadro 3. Escenario de simulación del modelo: ventilación natural.**

Variable	Natural ventilation / Ventilación natural	Combined ventilation / Ventilación combinada
Outside temperature (K) / Temperatura exterior (K)	295.7 (warm / cálido) 288.04 (cold / frío)	Constant / Constante 295.7
Outside wind speed (m·s <sup>-1</sup> ) / Velocidad del viento exterior (m·s <sup>-1</sup> )	2.41 (warm / cálido) 1.67 (cold / frío)	Constant / Constante 2.41
Heat source (W·m <sup>-2</sup> ) / Fuente de calor (W·m <sup>-2</sup> )	200 (constant from the ground / constante desde el suelo)	200 (constant from the ground / constante desde el suelo)
Outlet pressure / Presión a la salida	Normal at boundary / Normal a frontera	(FAN) Constant / Constante 10 Pa

### Statistical evaluation of the computational model

For the evaluation of the model, an analysis of variance was carried out with the data obtained experimentally and with the data simulated in Fluent®. The comparison was made for the two periods (warm and cold) in a natural ventilation scenario, where temperature (°C) and wind speed (m·s<sup>-1</sup>) were considered as main factors. Additionally, based on the position of the sensors inside the greenhouse, longitudinal profiles were made in the center of each span.

For statistical analysis, point data of the climate variables of the sensors (discrete) and those estimated by means of simulation (continuous) were used; these values showed normal (unbiased) behavior. Under these criteria, it was considered appropriate to use the  $S^2p$  estimator (Equation 1) to statistically conclude the model's evaluation in both periods. This gives the advantage of being able to relate the parameters of the experimental (X) and simulated data (Y), as well as their means ( $\bar{X}, \bar{Y}$ ), the variances ( $Sx^2, Sy^2$ ) (Equations 2 and 3, respectively) and the respective sample sizes ( $m$  and  $n$ ).

$$S^2p = \frac{(n-1)Sx^2 + (m-1)Sy^2}{n+m-2} \quad (1)$$

Where:

$$Sx^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (Xi - \bar{X})^2 \quad (2)$$

and

$$Sy^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^m (Yi - \bar{Y})^2 \quad (3)$$

The  $S^2p$  estimator was used because it is a weighted average of the two sampling variances ( $Sx^2$  and  $Sy^2$ ), where the weights represent the degrees of freedom. Considering the types of data (climatic) used, the suffix  $p$  indicates that the estimated variance is a weighted measure of  $Sx^2$  and  $Sy^2$ ; that is, they do not have the same weight in  $S^2p$ , but the importance of each of them depends on the number of observations in the sample. With this analysis, the acceptance or

variables que intervienen para obtener la solución (Cuadro 2).

Los escenarios simulados consistieron en un sistema de ventilación natural en el que se describió el comportamiento de la temperatura, la velocidad del viento y su efecto sobre la tasa de ventilación en el ambiente generado al interior del invernadero. Además, se planteó y se describió una alternativa para el manejo de temperaturas altas con ventilación natural en combinación con ventilación mecánica (Cuadro 3), y se evaluó su uso con base en el costo y tiempo de operación en el día.

### Evaluación estadística del modelo computacional

Para la evaluación del modelo se realizó un análisis de varianza con los datos obtenidos experimentalmente y con los datos simulados en Fluent®. La comparación se realizó para los dos periodos (cálido y frío) en un escenario de ventilación natural, donde se consideraron como factores principales a la temperatura (°C) y la velocidad del viento (m·s<sup>-1</sup>). Adicionalmente, con base en la posición de los sensores dentro del invernadero, se elaboraron los perfiles longitudinales en el centro de cada nave.

Para el análisis estadístico, se emplearon los datos puntuales de las variables climáticas de los sensores (discretos) y los estimados mediante simulación (continuos); dichos valores presentaron un comportamiento normal (insesgado). Bajo estos criterios, se consideró adecuado usar el estimador  $S^2p$  (Ecuación 1) para concluir estadísticamente la evaluación del modelo en ambos periodos. Lo anterior con la ventaja de que permite relacionar los parámetros de los datos experimentales (X) y los simulados (Y), así como sus medias ( $\bar{X}, \bar{Y}$ ), las varianzas ( $Sx^2, Sy^2$ ) (Ecuaciones 2 y 3, respectivamente) y los tamaños respectivos de las muestras ( $m$  y  $n$ ).

$$S^2p = \frac{(n-1)Sx^2 + (m-1)Sy^2}{n+m-2} \quad (1)$$



not of the hypothesis tests and, consequently, of the model was evaluated. In general, this estimator is appropriate to obtain approximations of population variance in inferential data analysis (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012).

The  $S^2p$  estimator can be used to obtain a  $t_o$  statistic (Equation 4) and test the hypothesis of the statistical difference of the means of the experimental and simulated data ( $\delta = \mu_x - \mu_y$ ):

$$t_o = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \delta_o}{\sqrt{\frac{S^2p}{n} + \frac{S^2p}{m}}} \sim t_{(m+n-2)} \quad (4)$$

For both periods, the parameters described and the corresponding statistical tests were calculated, as well as confidence intervals (Equations 5 and 6).

$$\underline{L} = \bar{X} - \bar{Y} - \sqrt{S^2p \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)} t_{\alpha/2}^{(n+m-2)} \quad (5)$$

$$\bar{L} = \bar{X} - \bar{Y} + \sqrt{S^2p \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)} t_{\alpha/2}^{(n+m-2)} \quad (6)$$

Once the model was evaluated, the behavior of the air inside the greenhouse and the spatial distribution of the temperature gradients in the simulated scenarios were described, both on the longitudinal (sensors 2, 5 and 6) and transversal (sensors 1, 2 and 3) profiles in the planes generated inside the greenhouse at a height of 0.7 m (at crop level) and 2.5 m (at sensor level). Ventilation rates were calculated and an analysis of the wind speed and temperature profiles was performed, as a result of the simulation that considered wind speed ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) as boundary conditions, as well as aspects of crop resistance, and window position and size.

Subsequently, the environmental conditions for tomato development and factor (temperature and wind speed) management were discussed, and alternatives were proposed to improve greenhouse ventilation through natural and mechanical ventilation. The extrapolation of the results by municipality was carried out with national meteorological databases, in which, previously, a “cleaning” process was performed in order to obtain data of more than 20 years in the State of Mexico and San Luis Potosí.

## Results and discussion

### Model evaluation

**Warm period.** Consistency between experimental and simulated data was mostly observed in the middle part of the greenhouse (Table 4). On the other hand, in the area immediately adjacent to the entry wall, there is a minor correlation, which could be due to

Donde:

$$Sx^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (Xi - \bar{X})^2 \quad (2)$$

y

$$Sy^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^m (Yi - \bar{Y})^2 \quad (3)$$

Se usó el estimador  $S^2p$  debido a que es un promedio ponderado de las dos varianzas muestrales ( $Sx^2$  y  $Sy^2$ ), donde los pesos representan los grados de libertad. Considerando los tipos de datos (climáticos) con los que se trabajó, el sufijo  $p$  indica que la varianza estimada es una medida ponderada de  $Sx^2$  y  $Sy^2$ ; es decir, no tienen el mismo peso en  $S^2p$ , sino que la importancia de cada una de ellas depende del número de observaciones en la muestra. Con este análisis, se evaluó la aceptación o no de las pruebas de hipótesis, y en consecuencia del modelo. En general, este estimador es apropiado para obtener aproximaciones de la varianza de la población en el análisis inferencial de datos (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012).

El estimador  $S^2p$  se puede usar para obtener una estadística  $t_o$  (Ecuación 4) y probar la hipótesis de la diferencia estadística de las medias de los datos experimentales y simulados ( $\delta = \mu_x - \mu_y$ ):

$$t_o = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \delta_o}{\sqrt{\frac{S^2p}{n} + \frac{S^2p}{m}}} \sim t_{(m+n-2)} \quad (4)$$

Para ambos periodos, se calcularon los parámetros descritos y las correspondientes pruebas estadísticas, además de intervalos de confianza (Ecuaciones 5 y 6).

$$\underline{L} = \bar{X} - \bar{Y} - \sqrt{S^2p \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)} t_{\alpha/2}^{(n+m-2)} \quad (5)$$

$$\bar{L} = \bar{X} - \bar{Y} + \sqrt{S^2p \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)} t_{\alpha/2}^{(n+m-2)} \quad (6)$$

Una vez evaluado el modelo, se describió el comportamiento del aire en el interior del invernadero y la distribución espacial de los gradientes de temperatura en los escenarios simulados, ambos sobre los perfiles longitudinales (sensores 2, 5 y 6) y transversales (sensores 1, 2 y 3) en los planos generados al interior del invernadero a una altura 0.7 m (a nivel de cultivo) y 2.5 m (a nivel de los sensores). Se calcularon las tasas de ventilación y se realizó un análisis de los perfiles de velocidad del viento y temperatura, como resultado de la simulación que consideró como condiciones de frontera a la velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), además de los aspectos de resistencia del cultivo, y posición y tamaño de ventanas.

Posteriormente, se discutieron las condiciones ambientales para el desarrollo del tomate y el manejo

**Table 4. Simulated and experimental data: warm period.**  
**Cuadro 4. Datos simulados y experimentales: periodo cálido.**

Temperatures (°C)/Temperaturas (°C)			
Sensor	Experimental/ Experimentales	Simulated/Simuladas	Error
1	25.50	24.63	0.87
2	25.68	25.31	0.37
3	28.54	24.85	3.69
5	26.34	23.65	2.69
6	25.71	26.43	-0.72

the turbulent flows that occur because of the pressure drop, a product of the porous wall. With the above, a standard deviation between 1.13 and 0.907 was obtained; in addition, a  $t_0$  of 2.127 was estimated, with  $t_{0.025}$  of 2.306, so the hypothesis is rejected with statistically equal means.

**Cold period.** Statistical analysis for the cold period showed differences in the transversal profile between the two data sets (Table 5). The 1 K temperature gradient maintains constant similarity in the transversal direction within the greenhouse when sampling. The experimental temperature values remain stable with each other, all being above 16 °C, but none greater than 17 °C, which did not occur with the simulated data ranging from 16.41 to 19.50 °C. However, the standard deviations are from 0.207 to 0.993, and the results of the analysis of variance indicate that the 95 % confidence interval (1- $\alpha$ ), for  $\mu_x - \mu_y$ , has limits from -0.391 to -2.483. Therefore, the limits indicate that the means do not differ statistically, hence the hypothesis is not rejected.

#### Description of wind speed profiles and temperature gradients

**Warm period.** In the longitudinal profile of Figure 2, it can be seen that when the wind speed decreases, the temperature increases. Figure 2a shows the interior of the greenhouse, where the lowest temperatures are in the area near the side inlet window, but increase

de los factores (temperatura y velocidad del viento), y se propusieron alternativas de mejora en cuanto a la ventilación del invernadero mediante ventilación natural y mecánica. La extrapolación de los resultados por municipio se realizó con bases de datos del meteorológico nacional, en las cuales, previamente, se realizó un proceso de “limpieza” con el fin de obtener datos de más de 20 años en el Estado de México y San Luis Potosí.

## Resultados y discusión

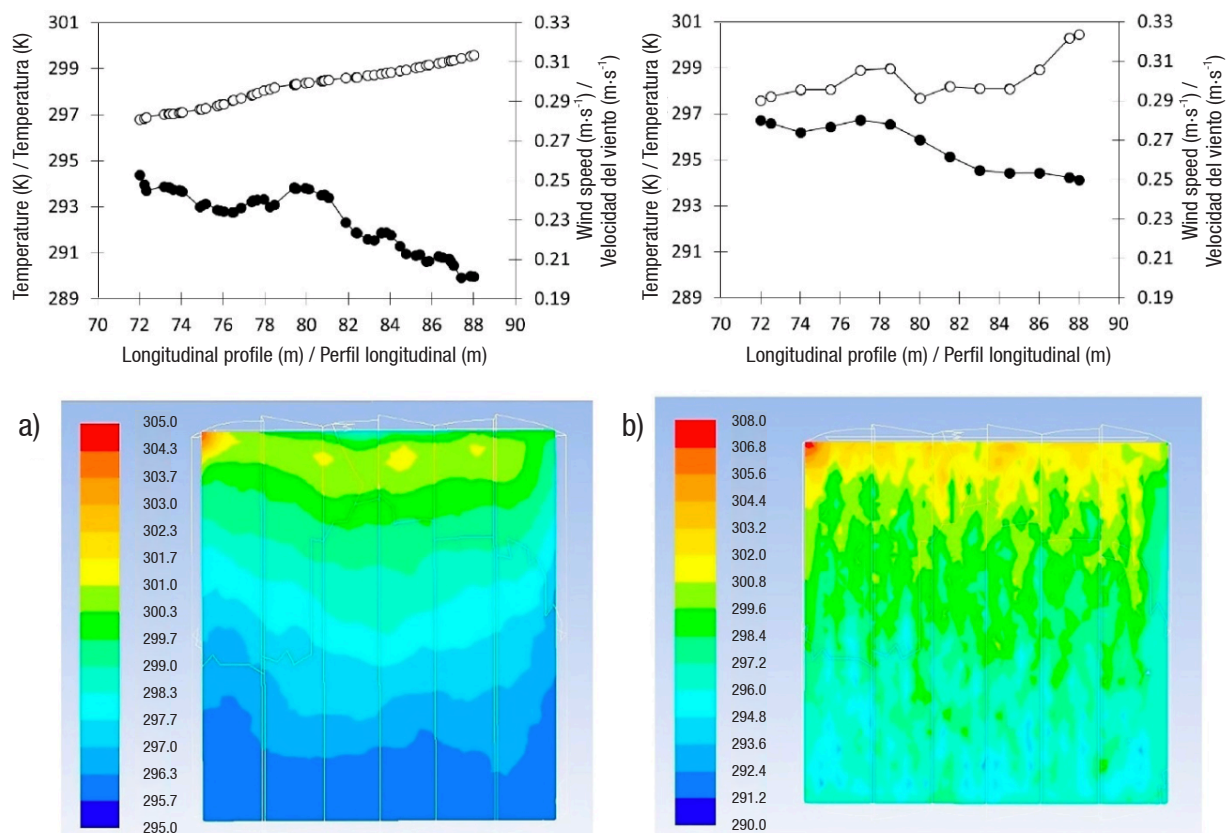
### Evaluación del modelo

**Periodo cálido.** La concordancia entre los datos experimentales y simulados se observó mayormente en la parte media del invernadero (Cuadro 4). Por su parte, en la zona inmediata a la pared de entrada existe una correlación menor, lo cual pudo ser debido a los flujos turbulentos que ocurren por la caída de presión, producto de la pared porosa. Con lo anterior, se obtuvo una desviación estándar entre 1.13 y 0.907; además, se estimó una  $t_0$  de 2.127, con  $t_{0.025}$  de 2.306, por lo que se rechaza la hipótesis con medias estadísticamente iguales.

**Periodo frío.** El análisis estadístico para el periodo frío mostró diferencias en el perfil transversal entre ambos conjuntos de datos (Cuadro 5). El gradiente de temperatura de 1 K mantiene similitud constante en el sentido transversal dentro del invernadero a la hora de

**Table 5. Simulated and experimental data: cold period.**  
**Cuadro 5. Datos simulados y experimentales: periodo frío.**

Temperatures (°C)/Temperaturas (°C)			
Sensor	Experimental/ Experimentales	Simulated/Simuladas	Error
1	16.32	17.53	-1.21
2	16.73	18.05	-1.32
3	16.61	17.83	-1.22
5	16.28	16.41	-0.13
6	16.19	19.50	-3.31



**Figure 2. Average longitudinal profile of simulated temperature (○) and wind speed (●). Plan view of the spatial distribution of temperatures at two heights: a) 2.5 m and b) 0.7 m. Outside temperature 295.7 K and outside wind speed 2.41 m·s<sup>-1</sup>.**

**Figura 2. Perfil longitudinal promedio de temperatura (○) y velocidad del viento (●) simulados. Vista en planta de la distribución espacial de temperaturas a dos alturas: a) 2.5 m y b) 0.7 m. Temperatura exterior 295.7 K y velocidad del viento exterior 2.41 m·s<sup>-1</sup>.**

when approaching the outlet side window, whereas Figure 2b shows how the highest wind speeds extend along the plastic sidewalls of the greenhouse where the temperature is lower.

In the crop area (at 0.7 m), wind speed varies in magnitude between the corridor area and the crop area; however, temperature remains constant in the transversal profile. Longitudinally, there is a reduction in the flow to the outlet side window, so that air renewal in that area makes it difficult to regulate the temperature and, as it moves away from the inlet side window, the wind loses energy and the temperature increases to 2 K, thus having temperatures around 300 K. The temperature stratification at 0.7 m is less than at 2.5 m. In general, the wind maintains a speed of the order of 0.1 to 0.3 m·s<sup>-1</sup> at crop level, although on the sidewalls it goes from 0.4 to 0.7 m·s<sup>-1</sup>.

**Cold period.** The wind speed has a tendency to decrease from the sidewalls to the center of the greenhouse, where it increases its speed, but not enough to lower the temperature, having the maximum gradient in this

muestrear. Los valores experimentales de temperatura se mantienen estables entre sí, estando todos sobre los 16 °C, pero ninguno mayor a 17 °C, lo que no ocurre con los datos simulados que van de 16.41 a 19.50 °C. No obstante, las desviaciones estándar son de 0.207 a 0.993, y los resultados del análisis de varianza indican que el intervalo con nivel de confianza al 95 % (1-α), para  $\mu_x - \mu_y$ , tiene límites de -0.391 a -2.483. Por lo tanto, los límites indican que las medias no difieren estadísticamente, por ende, no se rechaza la hipótesis.

### Descripción de los perfiles de velocidad del viento y gradientes de temperatura

**Periodo cálido.** En el perfil longitudinal de la Figura 2, se puede observar que cuando la velocidad del viento disminuye, la temperatura aumenta. La Figura 2a presenta el interior del invernadero, en donde las temperaturas más bajas se encuentran en la zona cercana a la ventana lateral de entrada, pero incrementan conforme se acercan a la ventana lateral de salida. Por su parte, la Figura 2b muestra como las velocidades del viento más altas se extienden a lo largo

area. The same behavior is seen in the longitudinal profile, as well as the effect that ventilation has in the decrease and regulation of the temperature. Figure 3a shows the temperature stratification, whose values increase as the wind decreases. Wind speed remains constant between 0.1 and 0.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  in much of the greenhouse, but tends to zero as it approaches the outlet side window (Figure 3b).

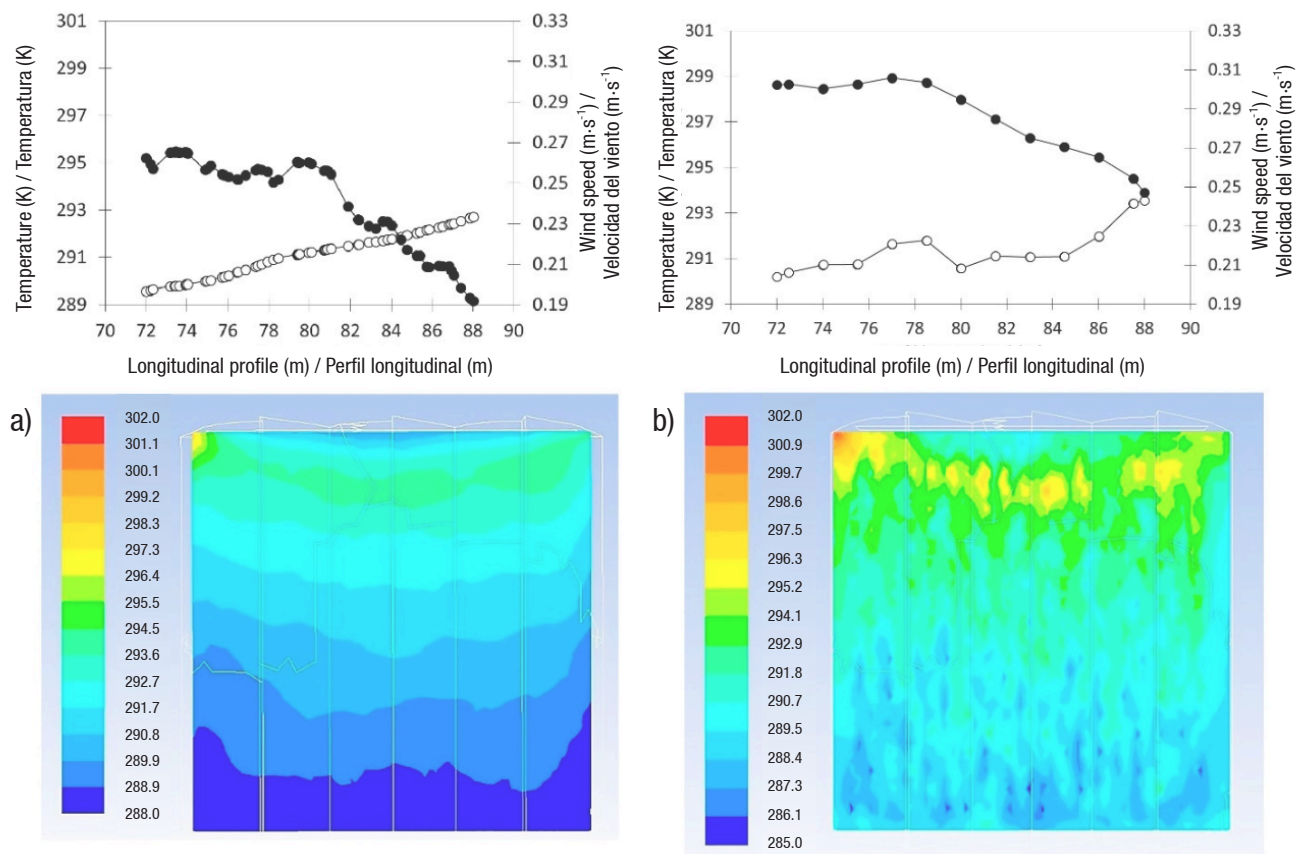
In the crop area, the temperature distribution is dispersed, with thermal gradients from 1 to 3 K when approaching the left sidewall. This is consistent with the maximum temperature period, indicating that the convective effect predominates over the radioactive one. This allows formulating hypotheses for climate management, in which case it is better to move the greenhouse air by pressure than by convection.

It has been observed that wind speed tends to decrease in the center of the greenhouse due to the resistance generated by the leaf area to the passage of air; in this case, the overhead window plays the role of “motorizing” ventilation. For the purposes of these

de las paredes plásticas laterales del invernadero en donde la temperatura es menor.

En la zona del cultivo (a 0.7 m), la velocidad del viento experimenta una variación en su magnitud entre la zona del pasillo y la zona del cultivo; no obstante, la temperatura permanece constante en el perfil transversal. Longitudinalmente existe una reducción en el flujo hacia la ventana lateral de salida, por lo que la renovación de aire en dicha zona dificulta regular la temperatura y, a medida que se aleja de la ventana de entrada, el viento pierde energía y la temperatura se incrementa hasta 2 K, teniéndose así temperaturas alrededor de los 300 K. La estratificación de temperatura a 0.7 m es menor que a 2.5 m. En general, el viento mantiene una rapidez del orden de 0.1 a 0.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a nivel de cultivo, aunque en las paredes laterales va de 0.4 a 0.7  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Periodo frío.** La velocidad del viento presenta una tendencia a disminuir desde las paredes laterales hasta el centro del invernadero, donde incrementa su rapidez, pero no lo suficiente como para disminuir



**Figure 3.** Average longitudinal profile of simulated temperature (O) and wind speed (●). Plan view of the spatial distribution of temperatures at two heights: a) 2.5 m and b) 0.7 m. Outside temperature 288.04 K and outside wind speed 1.67  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Figura 3.** Perfil longitudinal promedio de temperatura (O) y velocidad del viento (●) simulados. Vista en planta de la distribución espacial de temperaturas a dos alturas: a) 2.5 m y b) 0.7 m. Temperatura exterior 288.04 K y velocidad del viento exterior 1.67  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



simulations, from the point of view of ventilation, the crop functions as a porous medium where the movement of air decreases. Even with the highest flows obtained with the side windows open, the speed reduction puts into perspective the resistance of the crop in the ventilation process.

### Calculation of ventilation rates

In Table 6, the sign represents the direction of the flow. A negative sign implies that the air enters the greenhouse, and a positive sign is the exit of the air, this for the simulation of the fluids.

Based on the numerical results, it is possible to determine that opening the windows does not mean ventilating. On the one hand, it is important to capture as much air as possible, but windows are also needed to expel it, and thus favor the ventilation rate.

Under greenhouse operating conditions, simulated data show a ventilation rate of 34.48 hourly volumes; although it is low, according to what is recommended by ASHRAE (2016), it is considered a suitable growing environment.

### High temperature management alternative: combined ventilation

In order to evaluate the feasibility of using mechanical ventilation as an emergent alternative in specific time periods, i.e., when external radiation increases the temperature inside the greenhouse, three motors were attached to the model, one in each span (Figure 1) at 2.5 m high. The catalogue dimensions are 1 x 1 m, which correspond to the Exafan® EX 36"-0.5 air extraction system model (Spain).

The analysis focused on the distribution of the temperature gradients within the greenhouse at a height of 2.5 m, with which a comparison was made between the natural ventilation system and the

la temperatura, teniéndose el máximo gradiente en esta zona. En el perfil longitudinal se aprecia el mismo comportamiento, así como el efecto que tiene la ventilación en la disminución y regulación de la temperatura. En la Figura 3a, se muestra la estratificación de la temperatura, cuyos valores aumentan conforme el viento disminuye. La velocidad del viento se mantiene constante entre 0.1 y 0.4 m·s<sup>-1</sup> en gran parte del invernadero, pero tiende a cero a medida que se acerca a la ventana lateral de salida (Figura 3b).

En la zona del cultivo, la distribución de temperatura es dispersa, con gradientes térmicos de 1 a 3 K al acercarse a la pared lateral izquierda. Lo anterior es consecuente con el periodo de máxima temperatura, lo que indica que el efecto convectivo predomina sobre el radiactivo. Esto permite plantear hipótesis para la gestión del clima, en cuyo caso es mejor mover el aire del invernadero por presión que por convección.

Se ha observado que la velocidad del viento tiende a disminuir en el centro del invernadero por la resistencia que genera el área foliar al paso del aire; en este caso, la ventana cenital juega el papel de “motorizar” la ventilación. Para los fines de estas simulaciones, desde el punto de vista de la ventilación, el cultivo funciona como un medio poroso donde el movimiento del aire disminuye. Aun con los mayores flujos obtenidos con las ventanas laterales abiertas, la reducción de velocidades pone en perspectiva la resistencia del cultivo en el proceso de ventilación.

### Cálculo de tasas de ventilación

En el Cuadro 6, el signo representa el sentido del flujo. Un signo negativo implica que el aire entra al invernadero, y uno positivo es la salida del aire, esto para la simulación de los fluidos.

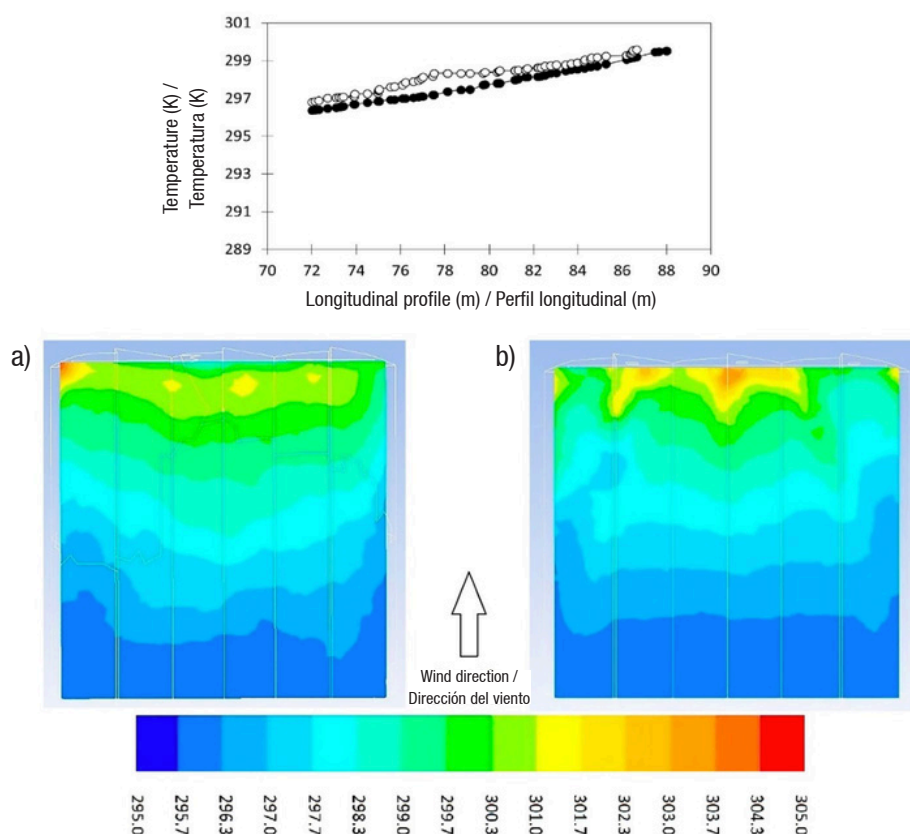
Con base en los resultados numéricos, es posible determinar que abrir las ventanas no significa ventilar.

**Table 6. Ventilation rates estimated with CFD: warm period.**

**Cuadro 6. Tasas de ventilación estimadas con DFC: periodo cálido.**

Boundary/ Frontera	Position/ Posición	Cold period / Periodo frío			Warm period / Periodo cálido		
		Flow/ Flujo (kg·s <sup>-1</sup> )	Flow rate/ Caudal (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	N Rate/ Tasa N (h <sup>-1</sup> )	Flow/ Flujo (kg·s <sup>-1</sup> )	Flow rate/ Caudal (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	N Rate/ Tasa N (h <sup>-1</sup> )
<i>Porous jump</i>	Overhead windows/ Ventanas cenitales	42.993	126 450.0	24.30	54.74	160 886.2	30.91
	Outlet side window/ Ventana lateral de salida	-1.841	-5 414.7	-1.05	6.32	18 596.6	3.57
	Inlet side window/ Ventana lateral de entrada	-41.151	-121 032.4	-23.25	-61.07	-179 485.7	-34.48
	Mass balance/ Balance de masa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0





**Figure 4. Average temperature gradients 2.5 m above the ground. Combined ventilation (●) and natural ventilation (○). Plan view of spatial temperature distribution: a) natural ventilation and b) combined ventilation.**

**Figura 4. Gradientes promedio de temperatura a 2.5 m del suelo. Ventilación combinada (●) y ventilación natural (○). Vista en planta de la distribución espacial de temperaturas: a) ventilación natural y b) ventilación combinada.**

combined one. This was done under the same boundary conditions as the warm period (temperature of 295.7 K and wind speed of  $2.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and 10 Pa of power in the motors.

The transversal profile in Figure 4 shows that the temperature gradients for both types of ventilation are very similar to each other (approximately 0.4 K), as well as the temperature distribution, which increases in the center of the greenhouse and decreases in the corridors. A possible explanation for this behavior is that although temperatures in this period are high, they are still within the productive range of the crop, in which case the use of mechanical ventilation is justified by increasing the renewal rate, in addition to which the economic cost is not significant in the production of the crop.

Although the temperature rises in both scenarios, combined ventilation has lower temperatures than natural ventilation. The suction effect of the fans directly influences the airflow into the greenhouse, which slightly decreases the thermal levels (Figure 4b). In addition, combined ventilation allows homogenizing the microclimate inside the greenhouse, although Table 7

Por un lado, es importante captar la mayor cantidad de aire, pero también se necesitan ventanas para expulsarlo, y con ello favorecer la tasa de ventilación.

Bajo las condiciones operativas del invernadero, los datos simulados muestran una tasa de ventilación de 34.48 volúmenes horarios, aun cuando es baja, de acuerdo con lo recomendado por la ASHRAE (2016), se considera un ambiente adecuado para cultivar.

#### **Alternativa de manejo de temperaturas altas: ventilación combinada**

Con el fin de evaluar la viabilidad del uso de ventilación mecánica como alternativa emergente en periodos específicos de tiempo, es decir, cuando la radiación exterior aumenta la temperatura en el interior del invernadero, se anexaron al modelo tres motores, uno en cada nave (Figura 1) a 2.5 m de altura. Las dimensiones del catálogo son de 1 x 1 m, que corresponde al modelo EX 36"-0.5 de sistemas de extracción de aire Exafan® (España).

El análisis se enfocó en la distribución de los gradientes de temperatura dentro del invernadero a 2.5 m de

**Table 7. Ventilation rates estimated with CFD, combined ventilation system.****Cuadro 7. Tasas de ventilación estimadas con DFC, sistema de ventilación combinado.**

Boundary/Frontera	Mass flow range/ Rango de flujo de masa	Value/Valor (kg·s <sup>-1</sup> )	Flow rate/Caudal (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	N rate/Tasa N (h <sup>-1</sup> )
Fan/Ventilador	1	3.46	10 168.16	1.9
	2	2.82	8 287.34	1.6
	3	3.04	8 933.87	1.75
Windows/Ventanas	Inlet side/ Lateral de entrada	-62.12	-182 556.74	-35.05
	Overhead/Cenitales	52.8	155 167.35	29.8
Mass balance/Balance de masa		0.0	0.0	0.0

**Table 8. Cost of using fans.****Cuadro 8. Costo de uso de ventiladores.**

	Operating time (h)/Tiempo de operación (h)			
	2	4	6	8
Agricultural tariff 9-N (MXN)/ Tarifa agrícola 9-N (MXN)	35.70	71.41	107.11	142.82
Domestic tariff (MXN)/ Tarifa doméstica (MXN)	53.49	106.98	160.47	220.56
Consumption (kW)/ Consumo (kW)	22.04	44.08	66.12	88.16

shows that overhead ventilation produces a better mixture of the inside air, which implies a slight variation in the temperature gradient throughout the greenhouse.

### Economic analysis of mechanical ventilation

In order to show the implications of using a motor in this type of system, an analysis of the cost (energy and economic) in greenhouse microclimate control was carried out. For this analysis, the agricultural tariff 9-N and the domestic one were used (Table 8). However, it is important to point out that the use time of mechanical ventilation or heating depends on outside climatic characteristics, and consequently of the behavior of the climate inside the greenhouse.

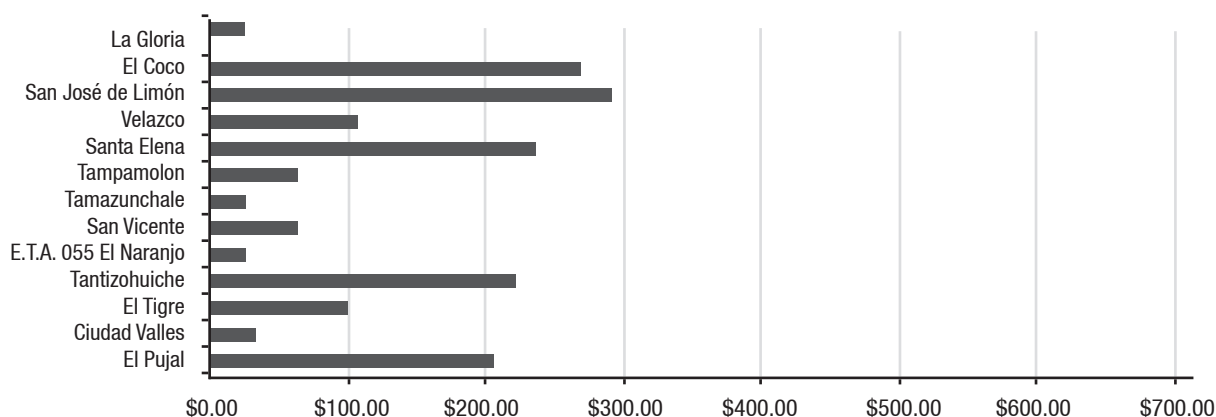
### Estimation of ventilation costs by municipality

One way of calculating forced ventilation costs is by considering the number of days with temperatures above a preset temperature, with a 30 °C threshold used in this case. Figure 5 shows the estimated costs for the use of three fans for 8 h in 13 geographical points of San Luis Potosí that had days above 30 °C. The cost of using 8 h of fan activity is approximately \$25.00 MXN in the warm region. On the other hand, in the geographical points of the State of Mexico with the highest number of days above 30 °C (El Coco, San José de Limón, Santa Elena), the costs can be higher than \$200.00 MXN for the use of forced ventilation for 8 hours every hot day of

altura, con lo que se hizo una comparación entre el sistema de ventilación natural y el combinado. Lo anterior bajo las mismas condiciones de frontera del periodo cálido (temperatura de 295.7 K y velocidad del viento de 2.41 m·s<sup>-1</sup>) y 10 Pa de potencia en los motores.

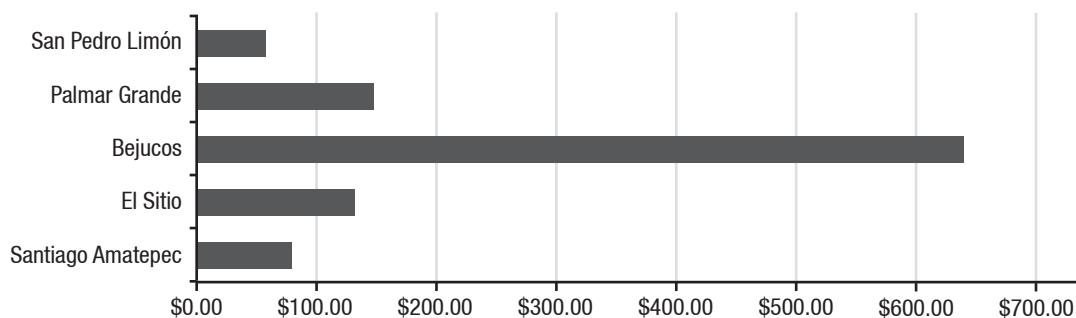
El perfil transversal de la Figura 4 muestra que los gradientes de temperatura para ambos tipos de ventilación son muy similares entre sí (aproximadamente 0.4 K), así como la distribución de la temperatura, la cual incrementa en el centro del invernadero y reduce en los pasillos. Una posible explicación de este comportamiento es que aunque las temperaturas en este periodo son altas, aun se encuentran en el rango productivo del cultivo; en cuyo caso el uso de ventilación mecánica se justifica al incrementar la tasa de renovación, además de que el costo económico no es significativo en la producción del cultivo.

Aunque la temperatura presenta un ascenso en ambos escenarios, la ventilación combinada genera temperaturas inferiores a la natural. El efecto de succión de los ventiladores influye directamente en el flujo del aire al interior del invernadero, lo que disminuye ligeramente los niveles térmicos (Figura 4b). Además, la ventilación combinada permite homogenizar el microclima al interior del invernadero; aunque en el Cuadro 7 se muestra que la ventilación cenital produce una mejor mezcla del aire interior, lo que implica una ligera variación en el gradiente de temperatura a lo largo del invernadero.



**Figure 5. Costs (MXN) for electricity (kW) with agricultural tariff (9-N) estimated for 8 h of forced ventilation use in greenhouses in municipalities of San Luis Potosí.**

**Figura 5. Costos (MXN) por concepto de electricidad (kW) con tarifa agrícola (9-N) estimados por 8 h de uso de ventilación forzada en invernaderos de municipios de San Luis Potosí.**



**Figure 6. Costs (MXN) for electricity (kW) with agricultural tariff (9-N) estimated for 8 hours of forced ventilation use in greenhouses in five geographic points of the State of Mexico.**

**Figura 6. Costos (MXN) por concepto de electricidad (kW) con tarifa agrícola (9-N) estimados por 8 h de uso de ventilación forzada en invernaderos en cinco puntos geográficos del Estado de México.**

the year. The increase in the number of hours of forced ventilation, as well as the number of fans, implies an increase in the economic cost.

On the other hand, forced ventilation costs in the State of Mexico (Figure 6) are generally lower than in San Luis Potosí, with the exception of the Bejucos station, where they can be higher than \$600.00 MXN. The Bejucos station is located in the south of the State of Mexico, where temperatures exceed the maximum threshold during most of the year. It is also noteworthy that the number of municipalities where it is necessary to implement forced ventilation is lower in the State of Mexico than in San Luis Potosí. This is due to the fact that in the former there are temperatures higher than the maximum threshold in the south, while in the latter the places with high temperatures include the center and south of the state.

## Conclusions

The three-dimensional CFD simulations allowed a global vision of the spatial distribution of the wind

## Análisis económico de la ventilación mecánica

Con el fin de mostrar las implicaciones del uso de un motor en este tipo de sistemas, se realizó un análisis del costo (energético y económico) en el control del microclima del invernadero. Para este análisis se usó la tarifa agrícola 9-N y la doméstica (Cuadro 8). Sin embargo, es importante destacar que el tiempo de uso de la ventilación mecánica o calefacción está en función de las condiciones climáticas exteriores, y por consiguiente del comportamiento del clima al interior del invernadero.

## Estimación de costos de ventilación por municipio

Una forma de calcular los costos de ventilación forzada es considerando el número de días con temperaturas superiores a una temperatura preestablecida, en este caso se utiliza el umbral de 30 °C. En la Figura 5 se muestran los costos estimados por el uso de tres ventiladores durante 8 h en 13 puntos geográficos de San Luis Potosí que presentaron días por arriba de 30 °C. El costo del uso de 8 h de actividad de los ventiladores

inside the greenhouse, thereby making it possible to infer its climatic characteristics. The use of this tool allows modeling the economic cost and time for the management of environmental resources in a greenhouse. In addition, the greenhouse's topology allows adapting its environmental conditions in the speed and temperature ranges (from 15 to 23 °C) recommended for tomato cultivation.

The data from the simulations with natural ventilation, in both periods, have been satisfactorily contrasted with the experimental data, although there is a lower correlation of temperatures in the area near the inlet wall and the sidewall of the greenhouse, caused by turbulent flows due to the pressure drop, a product of the porous wall. Statistical analysis indicates that this difference is not significant to reject the model's results, so the model can be used to satisfactorily represent the microclimate inside the greenhouse.

The overhead windows have the air outlet (chimney effect) function, while the inlet side window has greater relative importance due to its higher rate of ventilation caused by the direction of the wind.

When temperature limits are exceeded, the use of a mechanized ventilation system is feasible, although only for a specific period in each region. If the mechanical system's operating time is regulated, the costs can be reduced in such a way that they do not impact on production costs and crop quality is maintained.

#### End of English version

## References / Referencias

- Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*, 8(2), 1-36. doi: 10.3390/buildings8020024
- ASHRAE. (2016). *Standard 62.1: Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta: Author.
- Avendaño-Ruiz, B., & Schwentesius-Rindermann, R. (2005). Factores de competitividad en la producción y exportación de hortalizas: el caso del Valle de Mexicali, B.C., México. *Problemas del desarrollo*, 36(140), 165-192. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0301-70362005000100008](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362005000100008)
- Bouhoun-Ali, H., Bournet, P. E., Danjou, V., Morille, B., & Migeon, C. (2014). CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosystems Engineering*, 127, 159-175. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017
- Bouhoun-Ali, H., Bournet, P. E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2017). Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of

es de aproximadamente \$25.00 MXN en la región cálida. Por su parte, en los puntos geográficos del Estado de México con mayor número de días con temperatura por arriba de 30 °C (El coco, San José de Limón, Santa Elena), los costos pueden ser superiores a los \$200.00 MXN por el uso de ventilación forzada durante 8 h todos los días calurosos del año. El aumento en el número de horas de ventilación forzada, así como del número de ventiladores implica un aumento en el costo económico.

Por otro lado, los costos de ventilación forzada en el Estado de México (Figura 6) son generalmente inferiores a los de San Luis Potosí, a excepción de la estación Bejucos, en la que pueden ser superiores a los \$600.00 MXN. La estación Bejucos se encuentra ubicada al sur del Estado de México, donde las temperaturas superan el umbral máximo durante gran parte del año. También es notable que el número de municipios donde es necesario implementar la ventilación forzada es menor en el Estado de México que en San Luis Potosí. Lo anterior debido a que en el primer estado solamente en el sur se presentan temperaturas mayores al umbral máximo, mientras que en el segundo los lugares con temperaturas altas abarcan el centro y sur del estado.

## Conclusiones

Las simulaciones realizadas mediante DFC en tres dimensiones permitieron una visión global de la distribución espacial del viento en el interior del invernadero, y con ello fue posible inferir sus características climáticas. El uso de esta herramienta permite modelar el costo económico y el tiempo para la gestión de recursos ambientales en un invernadero. Además, la topología del invernadero permite adaptar sus condiciones ambientales en los rangos de velocidad y temperatura (de 15 a 23 °C) recomendados para el cultivo del tomate.

Los datos de las simulaciones con ventilación natural, en ambos periodos, han sido contrastados de forma satisfactoria con los datos experimentales; aunque existe una correlación menor de temperaturas en la región cercana a la pared de entrada y a la pared lateral del invernadero, originada por flujos turbulentos debidos a la caída de presión, producto de la pared porosa. El análisis estadístico indica que esta diferencia no es significativa para rechazar los resultados del modelo, de manera que el modelo es útil para representar satisfactoriamente el microclima dentro del invernadero.

Las ventanas cenitales tienen la función de salida de aire (efecto chimenea), mientras que la ventana lateral de entrada tiene mayor importancia relativa debido a su mayor tasa de ventilación ocasionada por la dirección del viento.



- ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 26-40. doi: 10.1016/j.compag.2017.06.021
- Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110-133. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001
- Chia-Ren, C., Ting-Wei, L., Ren-Kai, T., Tso-Ren, W., & Chih-Kai, Y. (2017). Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation. *Biosystems Engineering*, 164, 221-234. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.10.008
- de Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability*, 9(1), 1-17. doi: 10.3390/su9010140
- Farber, K., Farber, P., Gräbel, J., Krick, S., & Ueberholz, P. (2017). A numerical study of a greenhouse CFD simulation including radiation heat transfer and transpiration. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 9(3), 161-168. doi: 10.1504/IJESMS.2017.085055
- Flores-Velázquez, J., Mejía-Saenz, E., Montero-Camacho, J. I., & Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, 45(5), 545-560. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952011000500002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000500002)
- Flores-Velázquez, J., Montero, J. I., Baeza, E., & López, J. C. (2014). Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(1), 1-16. doi: 10.3965/j.ijabe.20140701.001
- Flores-Velázquez, J., & Villarreal-Guerrero, F. (2015). Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2), 303-316. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342015000200007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000200007)
- García-Martínez, M. C., Balasch, S., Alcon, F., & Fernández-Zamudio, M. A. (2010). Characterization of technological levels in Mediterranean horticultural greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(3), 509-525. doi: 10.5424/sjar/2010083-1247
- Hanan, J. (1998). *Greenhouses. Advanced technology for protected horticulture*. Boca Raton: CRC Press.
- Hasselmann, K., & Hasselmann, S. (1998). Multi-actor optimization of greenhouse gas emission paths using coupled integral climate response and economic models. In: Schellnhuber, H. J., & Wenzel, V. (Eds.), *Earth system analysis: integrating science for sustainability* (pp. 381-415). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-52354-0\_2
- Ito, K., & Hattori, K. (2012). Numerical prediction of thermal environment and energy consumption in tunnel-type greenhouse with supplementary air-mixing and heating device. *Indoor and Built Environment*, 21(2), 292-303. doi: 10.1177/1420326X11409469
- Cuando se exceden los límites de temperatura es viable el uso de un sistema mecanizado de ventilación, aunque solo por un periodo específico en cada región. Si se regula el tiempo de operación del sistema mecánico, los costos se pueden reducir, de tal manera que no impacten sobre los costos de producción y que se mantenga la calidad del cultivo.

### Fin de la versión en Español

- Juárez-López, P., Bugarín-Montoya, R., Castro-Brindis, R., Sánchez-Monteón, A. L., Cruz-Crespo, E., Juárez-Roste, C. R., Alejo-Santiago, G., & Balois-Morales, R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente*, 3(8). Retrieved from <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/4.pdf>
- Katsoulas, N., Sapounas, A., de Zwart, F., Dieleman, J. A., & Stanghellini, C. (2015). Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 156(1), 90-99. doi: 10.1016/j.agwat.2015.04.003
- Maher, D., Sami, A., & Hana, A. (2018). CFD modelling of air temperature distribution inside tunnel greenhouse in semi-arid region. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 10(2), 112-124. doi: 10.1504/IJESMS.2018.091929
- Montero, J. I., Muñoz, P., Sánchez-Guerrero, M. C., Medrano, E., Piscia, D., & Lorenzo, P. (2013). Shading screens for the improvement of the night-time climate of unheated greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(1), 32-46. doi: 10.5424/sjar/2013111-411-11
- Moreno-Reséndez, A., Aguilar-Durón, J., & Luévano-González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15(29). Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14119052014>
- 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. doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.025
- Piscia, D., Montero, J. I., Melé, M., Flores, J., Pérez-Parra, J., & Baeza, E. J. (2012). A CFD model to study above roof shade and on roof shade of greenhouses. *Acta Horticulturae*, 952, 133-140. doi: 10.17660/ActaHortic.2012.952.15
- Rico-García, E., Castañeda-Mirada, R., García-Escalante, J. J., Lara-Herrera, A., & Herrera-Ruiz, G. (2007). Accuracy comparison of a mechanistic method and computational fluid dynamics (cfD) for greenhouse inner temperature predictions. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(2), 207-212. doi: 10.5154/r.rchsh.2006.01.002
- Roy, J. C., Pouillard, J. B., Boulard, T., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2014). Experimental and CFD results on the CO<sub>2</sub> distribution in a semi closed greenhouse. *Acta Horticulturae*, 1037, 993-1000. doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.131



- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2013). Boletín semanal del SIAP de la SAGARPA. Retrieved from <http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/002-e.html>
- Shen, Y., Wei, R., & Xu, L. (2018). Energy consumption prediction of a greenhouse and optimization of daily average temperature. *Energies*, 11(1), 65-82. doi: 10.3390/en11010065
- Tamimi, E., & Kacira, M. (2013). Analysis of climate uniformity in a naturally ventilated greenhouse equipped with high pressure fogging system using computational fluid dynamics. *Acta Horticulturae*, 1008, 177-184. doi: 10.17660/ActaHortic.2013.1008.23
- van Straten, G., & van Henten, E. J. (2010). Optimal greenhouse cultivation control: survey and perspectives. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(26), 18-33. doi: 10.3182/20101206-3-JP-3009.00004
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson Educación.