

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO CLIMÁTICO DE UN INVERNADERO BATICENITAL DEL CENTRO DE MÉXICO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

CLIMATE PERFORMANCE EVALUATION OF A GREENHOUSE IN CENTRAL MÉXICO USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Jorge Flores-Velázquez¹, I. Lorenzo López-Cruz¹, Enrique Mejía-Sáenz², J. Ignacio Montero-Camacho³

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, 62550. Jiutepec, Morelos. (jorge_flores@tlaloc.imta.mx).

²Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales, A.C., 56220. San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México. ³Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries (IRTA). km 2 Ctra. de Cabriels, CP. 08348. Barcelona, España.

RESUMEN

Una de las principales actividades económicas en México es la producción de hortalizas para satisfacer el mercado estadounidense y la superficie cultivada en ambiente protegido aumenta alrededor de 20 % anualmente. Pero la producción es restringida debido a temperaturas altas y bajas en periodos específicos, planteando la necesidad de un sistema de enfriamiento. La ventilación natural eficiente es un método efectivo para controlar el clima, pero su descripción es compleja y una simplificación demanda mayor conocimiento del proceso. El objetivo del presente estudio fue mostrar, mediante el planteamiento y la solución del modelo físico de movimiento del aire, la representación visual del flujo en un invernadero baticenital de 10 naves (110×90×4.7), típico del centro de México, y la distribución de temperaturas en el interior donde se simula un cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) totalmente desarrollado (IAF=4). El modelo utiliza el enfoque de dinámica de fluidos computacional (CFD). La construcción y validación del modelo se llevó a cabo en las instalaciones del Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries (IRTA) de Cabriels, Barcelona, España, del 2009 al 2010. El análisis de los resultados indica diferencias sustantivas en el flujo de aire debido a la orientación de la apertura de las ventanas. El análisis numérico (CFD) 3-dimensional permite una visión global de la distribución espacial del clima interior del invernadero y sus deficiencias climáticas. Para velocidades de viento de 3 m s⁻¹ en las primeras cinco naves, la ventilación lateral tiene más importancia relativa que la ventilación cenital debido al efecto eólico o térmico. La combinación de apertura de ventanas laterales y cenitales

ABSTRACT

One of the main economic activities in México is horticulture production in protected environments for the US market. The area under protected agriculture increases about 20 % yearly, notwithstanding production is restricted by high and low temperatures during specific periods. This poses the need for a cooling system. Efficient natural ventilation is an effective method for controlling climate, but its description is complex and requires more knowledge of the process. The objective of this study was to visually represent the air flow and temperature distribution in a cenital greenhouse with 10 spans (110×90×4.7), typical in central Mexico, by posing and solving the physical model of air movement. A totally developed (LAI=4) tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) crop was simulated. The model uses the computational fluid dynamics (CFD) approach and was structured and validated in the installations of the Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries (IRTA) de Cabriels, Barcelona, Spain, from 2009 to 2010. Analysis of the results indicates significant differences in air flow due to the direction of window opening. The 3-Dimensional numerical analysis (CFD) enabled overall visualization of the spatial distribution of the climate inside the greenhouse and its climatic deficiencies. For wind speeds of 3 m s⁻¹ in the first five spans, lateral ventilation is more important than roof ventilation because of wind or thermal effects. The combination of lateral and roof window opening increases thermal uniformity in the greenhouse by 30 % due to greater exchange flow through the roof windows, contributing fresh air to the interior, which maintains maximum gradients of 5-8 K.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: diciembre, 2012. Aprobado: enero, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 48: 131-146. 2014.

Key words: cooling system, wind effect, gas tracer, heat gradient, *Lycopersicon esculentum* Mill.

aumenta la uniformidad térmica del invernadero en 30 %, debido a un flujo mayor de entrada /salida por la ventana cenital que aporta aire fresco al ambiente interior manteniendo gradientes máximos de 5 a 8 K.

Palabras clave: sistema de enfriamiento, efecto eólico, gas trazador, gradiente térmico, *Lycopersicon esculentum* Mill.

INTRODUCCIÓN

El cultivo en invernadero involucra conocimiento del clima y la consecuente habilidad para su manejo, situación que ha permitido la expansión de esta tecnología. Esta expansión es frenada debido a condiciones climáticas en periodos marcados del año, cuando valores extremos de humedad y temperatura constituyen restricciones en el proceso de producción (Kittas *et al.*, 2005). En un ambiente confinado, donde se favorece la absorción de radiación solar, la consecuencia es un aumento de temperatura determinado por la tasa de ventilación que el sistema aporta. Por tanto, un diseño adecuado inicia con el sistema de ventilación que permita un control climático del ambiente del invernadero (Mistriotis *et al.*, 1997). Ventilar de manera natural, aprovechando el viento exterior y el gradiente de temperaturas (interior/exterior), es el método más usado debido al costo menor de instalación y mantenimiento (Montero *et al.*, 2001). Velocidades de viento menores de 3 m s⁻¹ o nulas, el uso de mallas protectoras de insectos en las ventanas y la construcción de invernaderos de grandes dimensiones incrementan la necesidad del conocimiento del microclima. Esto permitiría controlar algunos elementos climáticos y contribuir en la optimización de los recursos, que deriven en mejores sistemas de producción mediante los beneficios asociados a la distribución uniforme del aire (Bailey, 1995; Boulard y Wang, 2002; Willits *et al.*, 2006).

Entre los métodos para estudiar la ventilación natural se encuentran: el balance de masa de un gas trazador, el balance de energía y masa, métodos visuales mediante modelos a escalas o medida directa de velocidades y presiones en las ventanas (Baeza *et al.*, 2009); pero estas técnicas no explican detalladamente el proceso de intercambio de aire, lo que es una desventaja al extrapolar los resultados. El análisis computacional de la dinámica de fluidos ofrece la posibilidad de análisis puntual de ventilación (espacial). Esta herramienta permite resolver interrogantes

INTRODUCTION

Growing crops in a greenhouse involves knowing about and managing climate. Because of this, technology has expanded, but this expansion has been limited by climatic conditions in marked periods of the year when extreme humidity and temperatures affect the production process (Kittas *et al.*, 2005). In a confined environment that favors absorption of solar radiation, the consequence is an increase in temperature. This is determined by the rate of ventilation the system contributes. Therefore, good design of a greenhouse begins with a ventilation system that permits climate control of the greenhouse environment (Mistriotis *et al.*, 1997). Natural ventilation, which taking advantage of outside wind and the temperature (interior/exterior) gradient, is the most used method because of its lower installation and maintenance costs (Montero *et al.*, 2001). Wind speeds below 3 m s⁻¹ or no wind, the use of screens on windows to protect the crop from insects and the construction of large greenhouses increase the need for more knowledge of the microclimate. This would permit controlling some of the climate elements and contribute to optimizing resources and derive better production systems through the benefits associated with uniform distribution of the air (Bailey, 1995; Boulard and Wang, 2002; Willits *et al.*, 2006).

Among the methods used to study natural ventilation are the following: mass balance of a tracer gas, energy and mass balance, visual methods using scale models and direct measurement of speeds and pressures in the windows (Baeza *et al.*, 2009). These techniques, however, do not explain in detail the process of air exchange; this can be a disadvantage when extrapolating the results. Computational analysis of fluid dynamics offers the possibility of precise analysis of ventilation (spatial). This tool enables answering questions about management of the ventilation system to maintain sufficient air circulation and heat levels, as well as transference of mass (transpiration) between plants and air (Ould *et al.*, 2006).

Computational fluid dynamics (CFD) has been used in studies on air flow in closed installations, such as on poultry farms and greenhouses (Lee and Short, 2000; Reichrath *et al.*, 2002; Norton *et al.*, 2007). Numerical modelling allows precise

sobre el manejo del sistema de ventilación para mantener circulación suficiente del aire y los niveles de calor, así como transferencia de masa (transpiración) entre las plantas y el aire (Ould *et al.*, 2006).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se usa en estudios de flujo de aire en instalaciones cerradas, como granjas de aves e invernaderos (Lee y Short, 2000; Reichrath *et al.*, 2002; Norton *et al.*, 2007). La modelación numérica permite un seguimiento cuantitativo puntual de las variables climáticas (velocidad, presión, temperatura) en el interior del invernadero, bajo diferentes condiciones ambientales de frontera, con lo cual se pueden reducir inconvenientes de tiempo, espacio y costos que implican la experimentación de los fenómenos físicos (Norton *et al.*, 2007).

La simulación CFD también sirve para detectar deficiencias en el diseño (Flores-Velazquez *et al.*, 2011); por ejemplo, el aire que entra por la primera ventana sale por la segunda sin llegar a mezclarse con el aire en la zona que ocuparían las plantas. Este problema puede resolverse o disminuirse aumentando la pendiente del techo, de modo que el chorro de aire entrante se dirija hacia la zona de cultivo (Baeza *et al.*, 2009). Los estudios de Short *et al.* (2001) muestran el interés de mejorar la forma aerodinámica de la pared lateral del invernadero de manera que el viento, en lugar de impactar contra esta pared, se adapte a la forma del invernadero y sea conducido hacia una ventana de entrada.

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo numérico que permite mostrar el funcionamiento del sistema de ventilación natural de un invernadero cenital típico de 10 naves, bajo condiciones climáticas del centro de México, mediante la apertura de ventanas laterales, cenitales y su combinación, y manejo de éstas en el acondicionamiento del clima interior del invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del invernadero baticenital típico del centro de México

En México existe una gran diversidad de modelos de invernaderos, entre los que destaca el cenital construido en batería compartiendo una pared, es una estructura concatenada llamada Baticenital. El invernadero utilizado se ubica en el municipio de Villa de Arista, San Luis Potosí, México, 22° 38' 37" N y 100° 50' 56" O, con una altitud promedio de 1624 m. La zona

quantitative follow-up of the climate variables (speed, pressure, temperature) inside the greenhouse under different environmental boundary conditions and can reduce the inconveniences of time, space and costs implicated in experimentation of physical phenomena (Norton *et al.*, 2007).

CFD simulation can also serve to detect deficiencies in design (Flores-Velazquez *et al.*, 2011), for example, when air that enters through the first vent exits through a second without mixing with the air in the area that plants would occupy. This problem can be solved or diminished by increasing the slope of the roof so that the jet of entering air is directed toward the crop zone (Baeza *et al.*, 2009). The studies of Short *et al.* (2001) show the interest in improving the aerodynamic shape of the lateral wall of the greenhouse so that, instead of impacting against the wall, it adapts to the shape of the greenhouse and is conducted toward an entry vent.

The objective of this study was to develop a numerical model that would show how a natural ventilation system works in a typical 10-multi span greenhouse under the climate conditions typical of central Mexico, using open lateral and roof windows and combinations of these in conditioning the interior climate of the greenhouse.

MATERIALS AND METHODS

Description of the 10-multi span greenhouse typical of central México

In México there is a broad diversity of greenhouse models. Outstanding among these are cenital greenhouses constructed in series with common walls. It is a concatenated structure called baticenital. The greenhouse used in this study is located in the municipality of Villa de Arista, San Luis Potosí, Mexico, 22° 38' 37" N and 100° 50' 56" W, with average altitude of 1624 m. The area has an average mean annual maximum temperature of 27.1 °C and mean annual rainfall of 372.2 mm; the climate is classified as semi-arid BSohw"(e) (Figure 1) (García, 2003).

The greenhouse has lateral windows 3.5 m high on the outer walls of the greenhouse and roof windows on each of the 10 spans. The roof windows are hinged and movable, having a maximum aperture of 1.3 m×110 m (Table 1). The direction of dominant winds is perpendicular to the roof windows and average wind speed is 4.3 m s⁻¹ during the day and 0.8 m s⁻¹ during the night. The greenhouse is covered with low-density polyethylene.

registra una temperatura máxima promedio media anual de 27.1 °C y una precipitación media anual de 372.2 mm con un clima clasificado como semiárido, BSohw^(e) (Figura 1) (García, 2003).

El invernadero tiene de ventanas laterales de 3.5 m de alto en el perímetro del invernadero y ventanas cenitales en cada una de las 10 naves. Las ventanas cenitales son abatibles, apertura máxima de 1.3 m por 110 m de longitud y están cubiertas de malla anti insectos (Cuadro 1). La dirección del viento dominante es perpendicular a las ventanas cenitales y el promedio diurno es 4.3 ms⁻¹ y el nocturno es 0.8 ms⁻¹. El material de cubierta es polietileno de baja densidad.

Metodología de la dinámica de fluidos computacional

Un modelo de CFD se desarrolla en tres etapas: 1) el pre-proceso, 2) la solución y 3) el post-proceso (Anderson, 1995). El preproceso implica la generación de la malla del dominio, base para una simulación buena, que de confianza en el cálculo y así obtener resultados físicamente coherentes. Durante el preproceso se lleva a cabo: 1) selección del sistema a estudiar

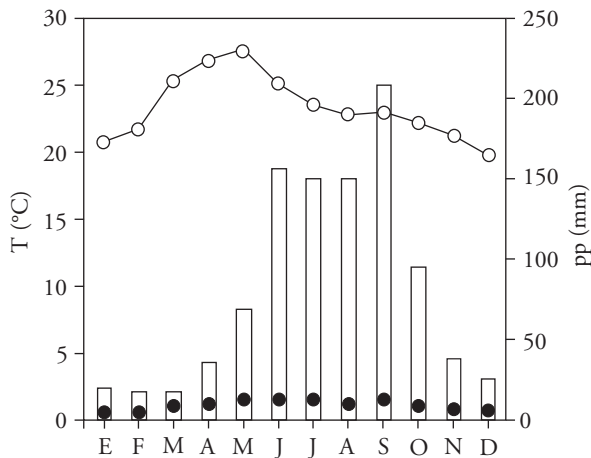


Figura 1. Precipitación y temperatura promedio en San Luis Potosí, México.

Figure 1. Average precipitation and temperature in San Luis Potosí, México.

Cuadro 1. Características de la malla.

Table 1. Mesh characteristics.

Malla	Hilos cm ⁻¹	Porosidad e, (Adim)	Reducción del flujo (%)	Diámetro del poro (mm)	Diámetro del hilo (mm)	Efecto viscoso(a)	Coef. de arrastre (C ₂)
M1	16.1×10.2	0.33	45	0.30	0.32	3.98e-9	19185.70

Computational fluid dynamics methodology

A CFD model is developed in three stages: 1) pre-process, 2) solution and 3) post-process (Anderson, 1995). The pre-process comprised the generation of the domain computational, the basis for good simulation that confers confidence in the calculation and thus obtains physically coherent results. During the process the following steps were carried out: 1) selection of the biosystem to be studied (greenhouse), 2) generation of the geometry, 3) decomposition of the geometry, 4) mesh: generation of a computational mesh, 5) definition of boundary conditions, and 6) export of the mesh.

Figure 2 shows the process of constructing the computational model. The greenhouse to be simulated is inserted into a volume of external air to represent the interaction between the exterior atmosphere and the interior environment of the greenhouse.

Analysis of ventilation is conducted in three dimensions. To optimize the use of informatics resources and because of the symmetry of the greenhouse, half of it is constructed and modeled, divided by a symmetry axis (Figure 2).

The model strategy consisted of create the geometry and mesh of the greenhouse volume, then the exterior volume. The size of the cells in mesh construction was 0.5 in directions “x” and “z” and 0.25 in direction “y”, resulting in the number of cells indicated in Table 2. The mesh quality was accepted considering two parameters: the aspect ratio that measures the width of the cell, 2.3 is considered good, and the orthogonal quality that can have values of zero to one if the mesh is poor to excellent. In this case, the minimum value was 0.56, with which the mesh was accepted as good.

Air movement is based on physical processes that are formulated in mathematical terms as a series of equations in partial derivatives to represent the laws that govern flow. If in a greenhouse air flow is considered within domain $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ during an interval of time $[0, t]$, the flow dynamics at each point x, y in a specific instant t is determined by the variables state, mass density $\rho(x, t)$, speed field $u(x, t)$ and its energy $e(x, t)$. These characteristics are included in the Navier-Stokes (N-S) equations, which are the system of equations to be solved by CFD. In this case, the commercial software Fluent[™], 6.3, was used to develop the simulations.

(invernadero), 2) generación de la geometría, 3) descomposición de la geometría, 4) mallado: generación de una malla computacional, 5) definición de las condiciones de frontera, y 6) exportación de la malla.

La Figura 2 muestra el proceso de construcción del modelo computacional. El invernadero por simular es insertado en un volumen de aire externo para representar la interacción ambiente exterior-interior del invernadero.

El análisis de la ventilación se realiza en tres dimensiones. Con el fin de optimizar el uso de recursos informáticos y debido a la simetría del invernadero se construye y modela la mitad de este, cortado por un eje de simetría (Figura 2).

La estrategia del modelo consistió en la construcción de la geometría y mallado del volumen del invernadero y luego el volumen exterior. El tamaño de las celdas en la construcción de las mallas, fue de 0.5 en la dirección "x" y "z" y 0.25 en la dirección "y", dando como resultado el número de celdas indicado en el Cuadro 2. La calidad de la malla se aceptó considerando dos parámetros; el *aspect ratio*, que mide lo estrecho de la celda siendo 2.3 lo cual se considera bueno y la *orthogonal quality*, que puede tener valores de cero a uno para una mala malla a excelente, en

Numerical model implementation process

The process begins with importing the mesh model and defining the boundary conditions and initial hypotheses. In this case, a segregated solver based on implicit pressure and a stationary state is assumed. The turbulence model that showed best results was the Launder and Spalding (1972) two equation $K-\epsilon$, and the convergence criteria were 1×10^{-6} , 1×10^{-5} and 1×10^{-3} for energy, continuity and moment, and turbulence, respectively. The tested scenarios and initial conditions are indicated in Table 3.

Validation of the model with water tunnel

To validate the model, the procedure proposed by Hunt and Linden (1997) was used. This procedure consists of reproducing the flows of one ventilation and making it circulate through a scale model structure. This methodology was used by Montero *et al.* (2001) in a single-tunnel greenhouse in which a roof window that opened on both sides and lateral windows were installed. The results were excellent. Figure 3 shows the characteristics of the 10-span central greenhouse built to a scale of 1:60 and

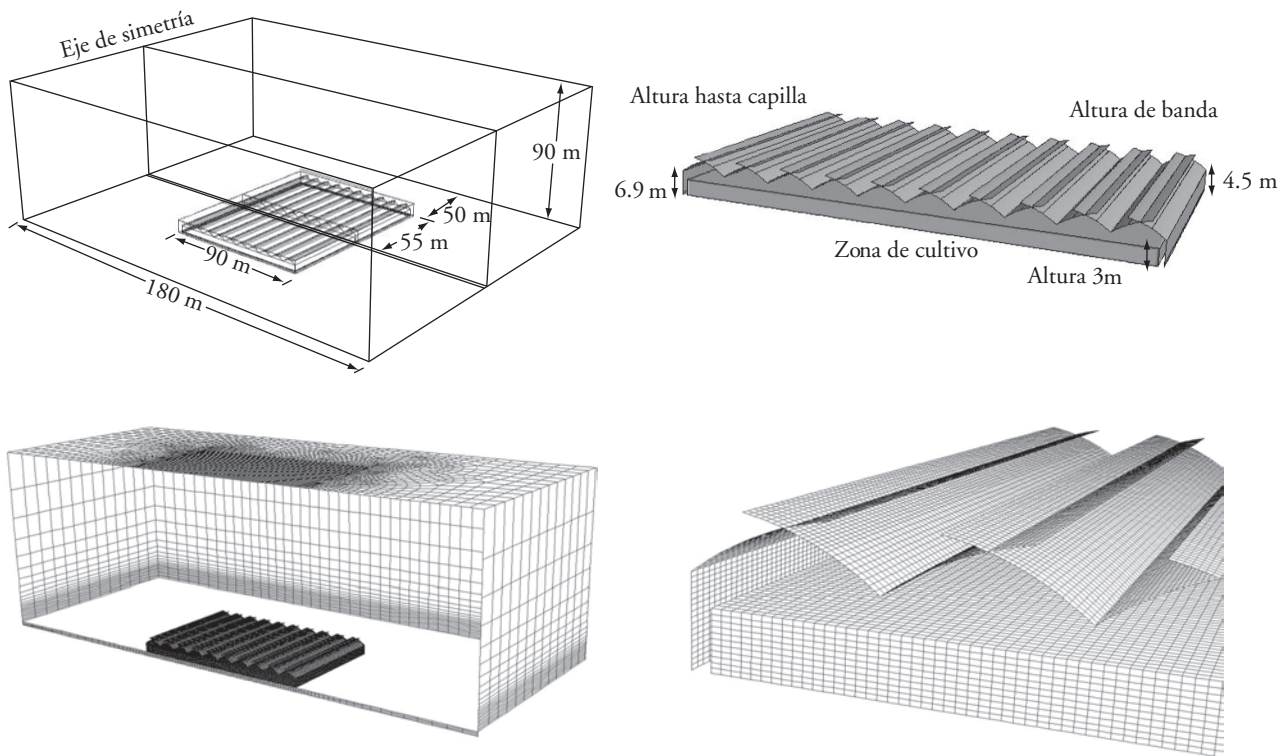


Figura 2. Representación esquemática del proceso de creación del modelo computacional y mallado del invernadero tipo cenital de 10 naves.

Figure 2. Schematic representation of the process of creating the computational model and mesh of the 10-span central-type greenhouse.

Cuadro 2. La geometría fue creada en GAMBIT® 2.4.6 con las siguientes dimensiones (largo x ancho x alto, (m)).**Table 2. Geometry was created in GAMBIT® 2.4.6 with the following dimensions (length x width x height, (m)).**

Núm. de celdas	Dimensiones del invernadero (m)	Dimensiones del dominio exterior (m)	Dimensiones de la zona de cultivo (m)
849371	90x55x6.9	270x105x90	88x54x3

este caso el valor mínimo fue 0.56, con lo cual se acepta como buena la malla.

El movimiento del aire está basado en procesos físicos que se formulan en términos matemáticos como una serie de ecuaciones en derivadas parciales para representar las leyes que gobiernan el flujo. Si en un invernadero se considera un flujo del aire dentro del dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ durante un intervalo de tiempo $[0, t]$, la dinámica del flujo en cada punto x , y en un instante específico t está determinado por las variables de estado, densidad de masa $\rho(x, t)$, el campo de velocidad $u(x, t)$ y su energía $e(x, t)$. Estas características son incluidas en las mencionadas ecuaciones de Navier-Stokes (N-S), que son el sistema de ecuaciones a resolver mediante CFD y que en este caso se utilizó la versión 6.3 del software comercial de Fluent® para el desarrollo de las simulaciones.

Proceso de implementación del modelo numérico

El proceso inicia con la importación de la malla y definición de las hipótesis, en este caso se usa un “solver” segregado, basado en presión, implícita y se asume estado estacionario. El modelo de turbulencia que ha mostrado mejores resultados fue $K-\epsilon$ de dos ecuaciones Launder y Spalding (1972), y los criterios de convergencia, fueron 1×10^{-6} , 1×10^{-5} y 1×10^{-3} respectivamente para energía, continuidad y momento y turbulencia. Los escenarios ensayados y condiciones iniciales se indican en el Cuadro 3.

Validación del modelo mediante túnel de agua

Para validar el modelo se aplicó el procedimiento propuesto por Hunt and Linden (1997). Consiste en reproducir los flujos de una ventilación y hacerla circular por una estructura construida a escala. Esta metodología fue utilizada por Montero *et al.* (2001) en un invernadero de una sola capilla tipo túnel en cuya cumbre se instaló una ventana cenital con apertura hacia ambos lados y ventanas laterales, en el cual lograron excelentes resultados. La Figura 3 muestra las características del invernadero cenital de 10 naves construido a escala 1:60, y la apertura de las ventanas cenitales a barlovento. El material del modelo es metacrilato y para analizar los campos de velocidad se inserta en

apertura de the roof windows (windward). The model was built with methacrylate. To analyze the speed fields, a “tunnel” is inserted where the fluid, in this case water, is made to circulate (Figure 3).

With a system of lights, it is possible to observe the flow of water reflected off the hydrated magnesium silicate particles and can be analyzed (Figure 4). Water flow was driven by a 2” centrifugal pump Series T (Gorman-Rupp, USA) with a maximum capacity of 215 L s^{-1} .

The scenarios tested were roof windows open toward the wind (windward) and away from the wind (leeward) (Figure 5). Images were analyzed with a video system with CCD (Charge Coupled Device), which takes several exposures (photographs) in instances of time, obtaining vector fields of wind speed. With this analysis, it is possible to compare the results of this technique with those of numerical methods (CFD).

Images were captured with a Genie M1400 (Teledyne DALSA, Ca.) camera, which can take 15-80 photos per second with a resolution of 1360×1024 dpi. The video system captures fluid movement revealed by particles suspended in the liquid medium (Figures 6A and 7A). It is possible to see the speed distribution pattern. The first roof window is that which permits entry of more air, although this flow does not have an effect beyond the third span since a large part exits through the second span. However, part of this flow returns toward the wall, creating a recursive flow (Figure 6A).

When the windows are open windward (Figure 7), despite the reduction of air flow through the roof window, the flows in the first span of the scale model used (Figure 7A) are similar to the results of the CFD simulation (Figure 7B) with an exterior wind speed of 5 m s^{-1} , the same as the speed created in the water tunnel. The concordance between flows contributes to confidence in the methods for describing air movement inside the greenhouse.

RESULTS AND DISCUSSION

Mass flows

When the windows facing the wind are open (Figure 8A), because of the small area of the roof

Cuadro 3. Condiciones de inicio e hipótesis asumidas.**Table 3. Initial conditions and assumed hypotheses.**

Condiciones de inicio y escenarios de simulación	
Velocidad del viento	Constante, rango de 1 a 5 m s ⁻¹
Temperatura	Constante 295 K (± 22 °K)
Apertura de ventanas (4 escenarios)	1) Cenitales abiertas a barlovento 2) Cenitales abiertas a sotavento 3) Cenitales abiertas a barlovento + laterales 4) Cenitales abiertas a barlovento + laterales
Tratamiento de medios porosos	Malla: 16.1×10.2 hilos (ε=0.33)
Fuente de calor	Cultivo: IAF=4 (CD=0.32) Haxaire, (1999) Constante desde el suelo, hipótesis de Boussinesq y activado el efecto de flotación en el modelo de turbulencia (200 W m ⁻² simulando cultivo)

un “túnel” por donde se hace circular el fluido, en este caso agua (Figura 3).

Mediante un sistema de luces es posible observar el flujo del agua reflejado en partículas reflectantes (silicato de magnesio hidratado) para su análisis posterior (Figura 4). El flujo del agua fue impulsado con una bomba centrífuga Serie T (Gorman-Rupp, USA) de 2” y con capacidad máxima de 215 L s⁻¹.

Los escenarios ensayados fueron ventanas cenitales abiertas de frente al viento (barlovento) y de espaldas al viento (sotavento) (Figura 5). El análisis de las imágenes se hizo con un sistema de video con CCD (Charge Coupled Device), que consiste en la toma de exposiciones (fotografías) instantáneas, permite obtener campos vectoriales de velocidad del viento y permite su comparación y los métodos numéricos (CFD).

Las imágenes se capturaron con una cámara Genie M1400 (Teledyne DALSA, Ca.) que toma 15 a 80 fotografías por segundo con una resolución de 1360x1024. El sistema de video capta el movimiento del fluido apoyado en las partículas suspendidas en el medio (Figuras 6A y 7A). Es posible observar el patrón en la distribución de la velocidad. La primera ventana cenital es la

window, the quantity of air that cannot enter through the first span is detoured when it hits the walls and moves away from the greenhouse roof, but it moves downward again after the sixth span and, here, the roof windows are again air entry vents.

Wind speeds

No differences in wind speed were observed at 1 and 2 m height, but there is a 90 % reduction relative to outside wind speed (Figure 9). Despite the greater flows permitted by opening the lateral window, there is a notable reduction in speed due to crop resistance in the process of ventilation. Opening the lateral windows, however, increases the flows in the crop zone (1 and 2 m high). When the lateral windows are open, comparatively faster speeds are observed, especially in the first three spans, and later, the air stagnates in a calm zone. In fact, when combining the roof window open windward with open lateral

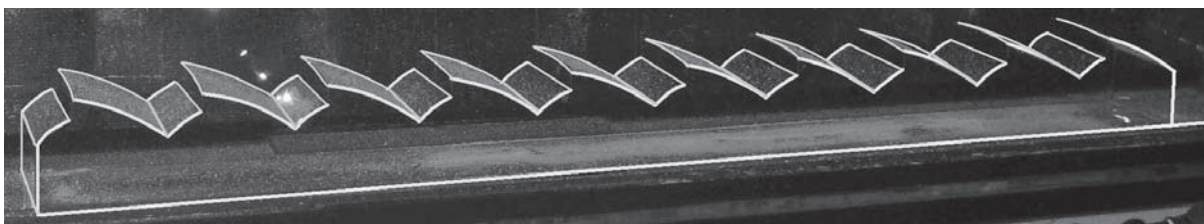


Figura 3. Maqueta del invernadero Batiscenic de 10 naves construida a escala 1:60 con ventanas cenitales abiertas.
Figure 3. Scale model of the 10-nave batiscenic greenhouse built to a scale of 1:60 with open roof windows.

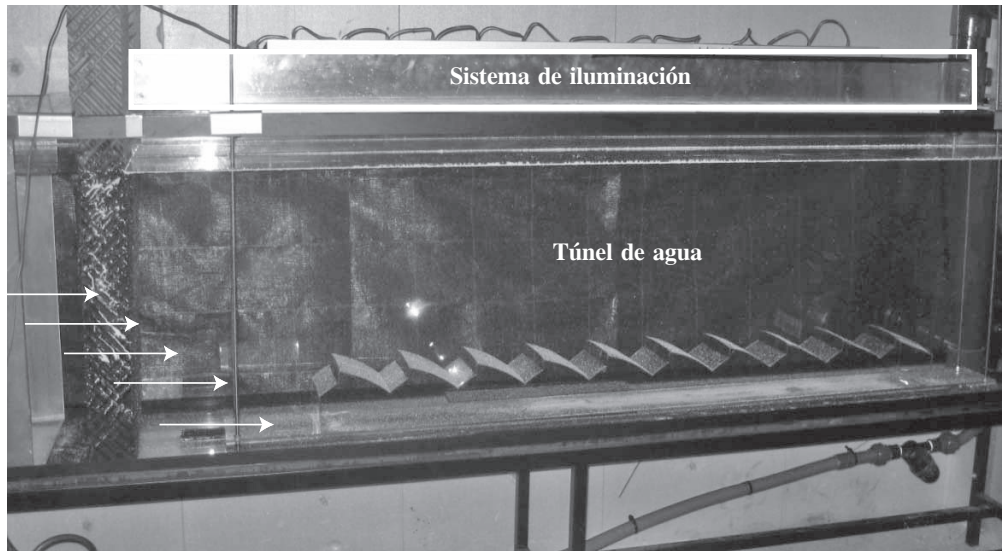


Figura 4. Túnel de agua en cuyo interior se hace fluir el fluido (en este caso agua) mediante un sistema de bombeo a través de la maqueta a escala.

Figure 4. Water tunnel through which the fluid is made to flow (in this case, water) through the scale model with a pumping system.

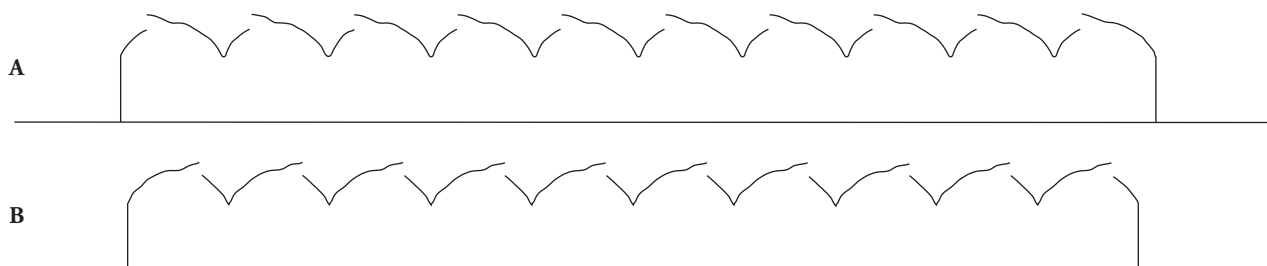


Figura 5. Modelos ensayados: A) ventanas cenitales abiertas a barlovento, y B) ventanas cenitales abiertas a sotavento.

Figure 5. Tested models: A) roof windows open windward, and B) roof windows open leeward.

que permite entrada mayor de aire, aunque este flujo no tiene un efecto más allá de la tercera nave pues gran parte de éste sale por la segunda nave, pero también, parte de ese flujo regresa hacia la pared haciendo un flujo recursivo (Figura 6A).

Cuando las ventanas se abren a sotavento (Figura 7) a pesar de la disminución del flujo de aire por la ventana cenital, comparativamente existe similitud entre los flujos en la primera nave cuando se usa el modelo a escala (Figura 7A) y los resultados de la simulación mediante CFD (Figura 7B) cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1} , como se hizo fluir en el túnel de agua. Esta concordancia de flujos, aporta confianza en los métodos para describir el movimiento del aire dentro del invernadero.

windows, there are speeds close to zero in the sixth span (Figure 9C), similar to what occurs in span 2 and 3 when only the roof window is open (Figure 10A). The same behavior was observed by Boulard and Baille (1995), who detected air entering in the initial area of a three-span cenital greenhouse with natural ventilation, and by Montero *et al.* (2001) in a tropical climate greenhouse.

The graphic results indicate that in a baticenital greenhouse, the importance of lateral window depends on the number of spans, since speed reduction after the fourth span is notable. The

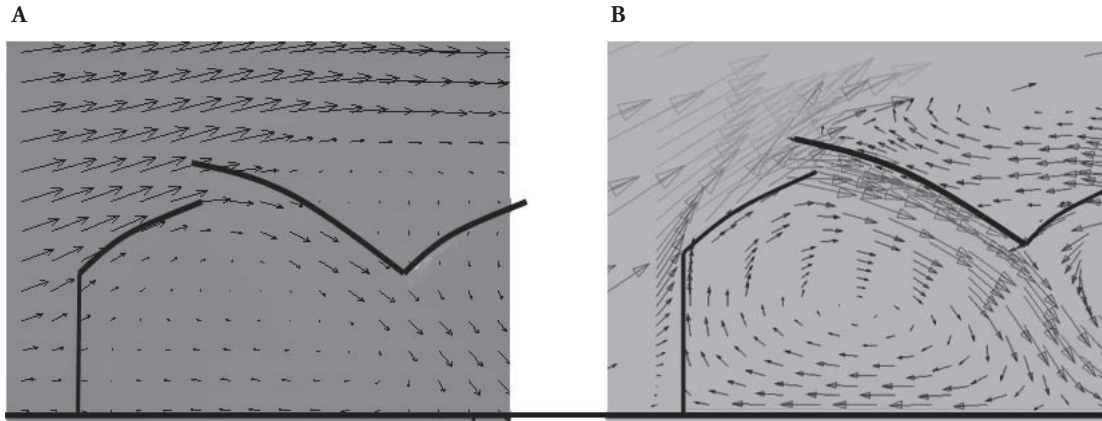


Figura 6. Comparación cualitativa de los vectores de viento entre A) el túnel de agua y B) simulados por CFD y se simulan en el exterior 5 m s^{-1} en condiciones similares, de la primera nave a barlovento.

Figure 6. Qualitative comparison of wind vectors A) water tunnel and B) simulated by CFD when 5 m s^{-1} is simulated in the exterior, under similar conditions, in the first nave, windward.

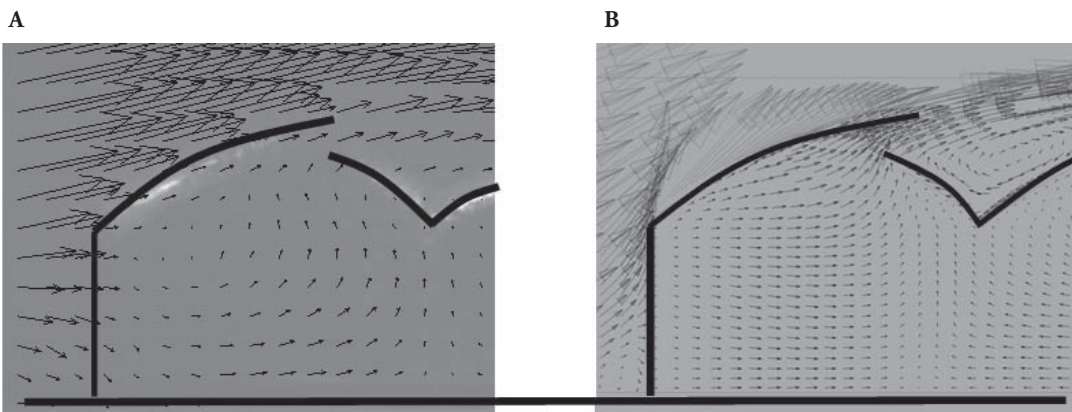


Figura 7. Comparación cualitativa de los ventores de viento entre A) el túnel de agua y B) mulados por CFD, bajo condiciones similares, de la primera nave a sotavento.

Figure 7. Qualitative comparison of wind vectors A) water tunnel and B) simulated by CFD under similar conditions, in the first nave, leeward.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujos en masa

Cuando las ventanas se abren de frente al viento (Figura 8A), debido al área reducida de la ventana cenital, la cantidad de aire que no entra por la primera capilla al chocar con las paredes se desvía y se aleja del techo del invernadero, pero este aire exterior vuelve a bajar después de la sexta nave y aquí las ventanas cenitales vuelven a ser de entrada de aire.

roof windows of the first and second naves are very important in distributing speeds since 50 % of the air that enters through the first window exits through the second without having mixed with the rest of the air (Figure 10). For this reason, a feasible combination would be to close windows of spans two and three and to open the windows windward beginning with span four or five.

The crop simulated as a porous medium slows interior air displacement. Consequently, air displacement on top is greater. According to the

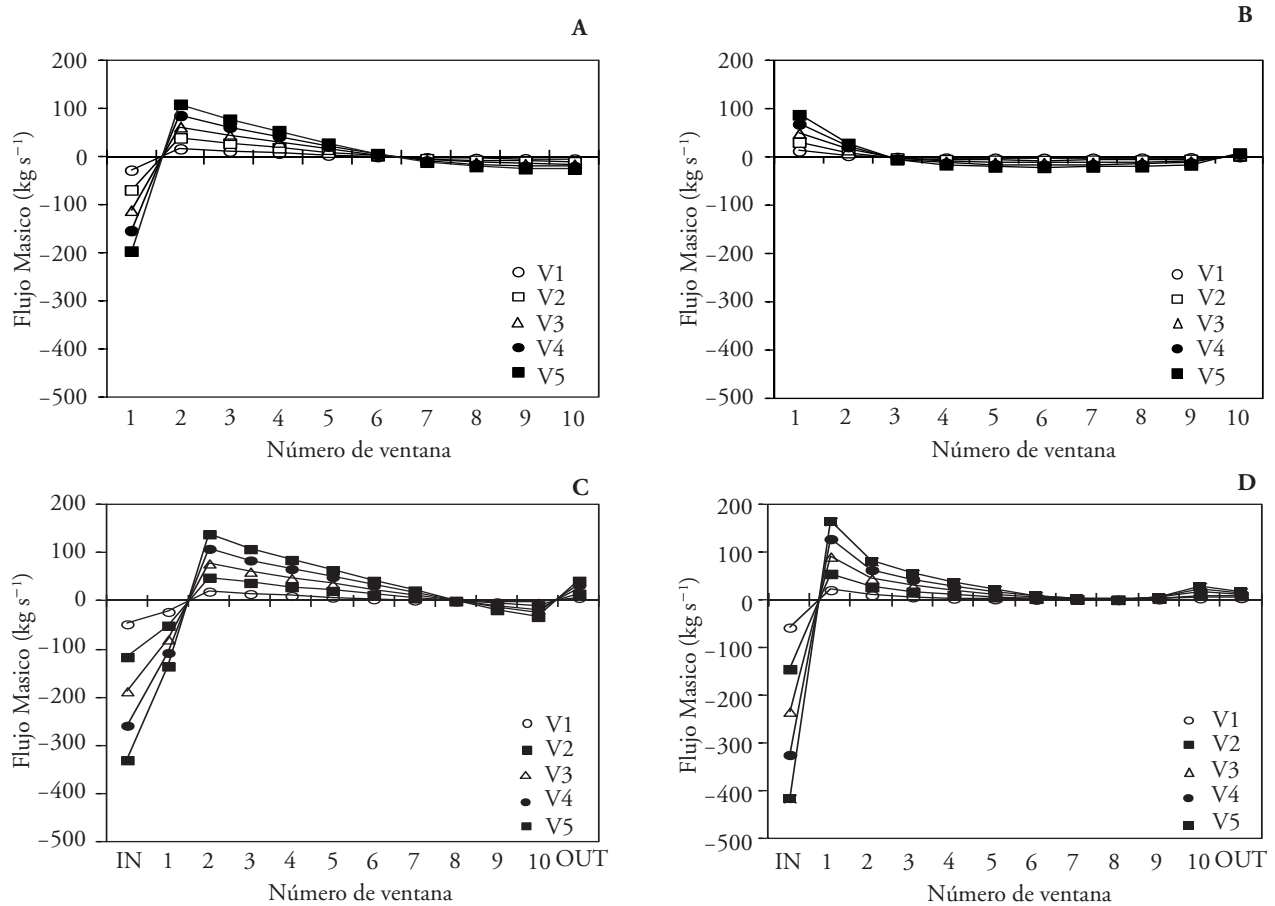


Figura 8. Flujos máxicos para velocidades de viento exterior de 1 a 5 m s⁻¹, simulando ventanas cenitales. A) abiertas a barlovento y lateral cerrada, B) abiertas en direccin a sotavento, lateral cerrada, C) abiertas a barlovento + lateral y D) abiertas a sotavento + laterales. IN se refiere a la ventana lateral a barlovento, y OUT a la lateral a sotavento.
Figure 8. Mass flows for outdoor wind speeds of 1 to 5 m s⁻¹, simulating roof windows. A) open windward and closed lateral windows, B) closed leeward, closed lateral, C) open windward + laterals, and d) open leeward + laterals. IN refers to the lateral window on the windward side, and OUT refers to the lateral window on the leeward side.

Velocidades del viento

No se observaron diferencias de velocidad a 1 y 2 m de altura, y sí una reduccin de velocidad interior del 90 %, con respecto al exterior (Figura 9). A pesar de que la apertura de la ventana lateral permite flujos mayores, es notable la reduccin de velocidades, debido a la resistencia del cultivo en el proceso de ventilacin, sin embargo la apertura de ventanas laterales incrementa los flujos en la zona del cultivo (1 y 2 m de altura). Comparativamente, cuando se abren las ventanas laterales se observan velocidades mayores, sobre todo en las primeras tres naves, que después de estancarse en una zona de calma; de hecho cuando se combina la ventana cenital abierta de frente al viento y laterales, existe en la sexta nave velocidades

numerical results, it is possible that capturing a large quantity of entering air is important, but also needed is a window area large enough to expel it to favor a higher rate of ventilation. It is also convenient to redirect entering air toward the crop zone to prevent the entering wind from going out through span two without mixing.

Temperature behavior

Presence of the crop reduces the flow of energy from the soil into the environment due to crop transpiration. This implies lower environmental temperature gradients and highlights the specific importance of roof ventilation, which, combined with crop transpiration, can maintain homogeneous

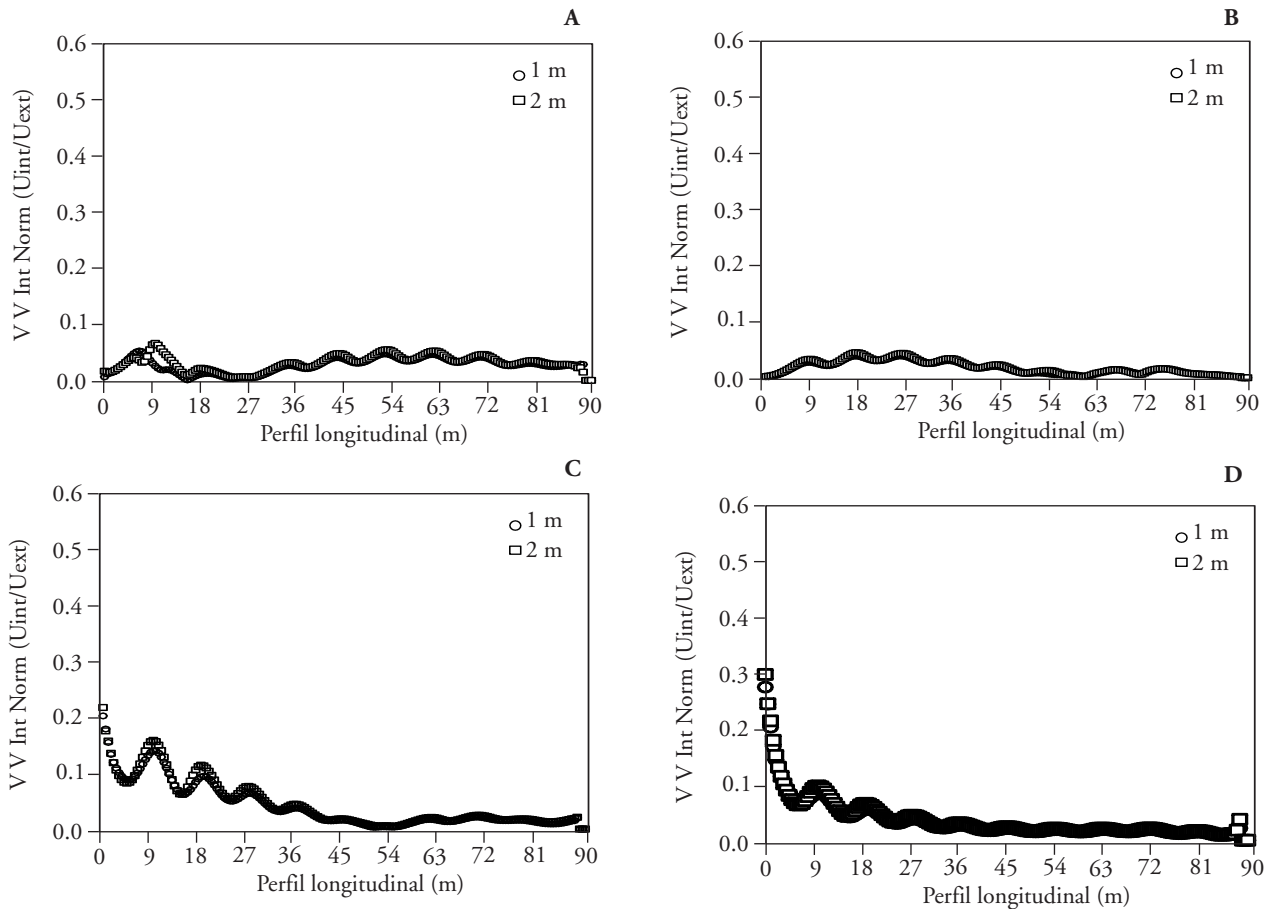


Figura 9. Velocidad interna promedio del viento al 1(Y1) y 2(Y2) m del suelo en los cuatro escenarios ensayados. A) cenitales abiertas a sotavento, B) cenitales abiertas a barlovento, C) cenitales a sotavento + laterales y D) cenitales abiertas a barlovento + laterales.

Figure 9. Average internal wind speed at 1(Y1) and 2(Y2) m from the ground in the four tested scenarios. A) roof windows open leeward, B) roof windows open windward, C) roof windows leeward + laterals, and D) roof windows open windward + laterals.

cercanas a cero (Figura 9 C), igual que en las naves dos y tres, cuando sólo la cenital está abierta (Figura 10A). El mismo comportamiento fue observado por Boulard and Baille (1995) en un invernadero cenital de tres naves, con ventilación natural, al detectar una entrada de aire en la zona inicial del invernadero y por Montero *et al.* (2001) en un invernadero de clima tropical.

Los resultados gráficos indican que en un invernadero Baticenital la importancia de la ventana lateral depende del número de naves, pues la reducción de velocidades después de la cuarta nave es notable. Las ventanas cenitales de la primera y segunda nave son muy importantes en la distribución de velocidades, pues 50 % del aire que entra por la primera ventana sale por la segunda sin haberse mezclado con el resto del aire (Figura 10). Por esto una combinación viable

levels of temperature in the crop zone (1-2 m) with outside wind speeds of $3-5 \text{ m s}^{-1}$. When wind speed is below 3 m s^{-1} , roof ventilation can produce thermal leaps in the order of $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in the central part of the greenhouse (Figure 11 A and B).

The combination of lateral and roof ventilation is the recommended option for shorter structures since thermal gradients tend to increase as entering air moves away from the frontal window (Figure 11C and D).

The zones with the highest temperatures, with the outside wind speed of 5 m s^{-1} are on the soil surface since the soil constitutes the only source of heat in the numerical simulation model (Figure 12).

Figure 13 shows, tri-dimensionally, a top view of the temperature field 2 m above ground of the two configurations studied: roof windows open windward (Figure 13A) and leeward (Figure 13B).

sería cerrar las ventanas dos y tres y a partir de la nave cuatro o cinco abrirlas a barlovento.

El cultivo simulado como medio poroso frena el desplazamiento interior del aire. En consecuencia, el desplazamiento del aire por encima es mayor. De acuerdo con los resultados numéricos es posible observar que es importante captar cantidad mayor de aire de entrada, pero también se necesita un área de ventanas para expulsarlo y con ello favorecer una mayor tasa de ventilación. Además es conveniente re-dirigir el aire entrante hacia la zona de cultivo, para evitar que el viento que entre en la ventana uno salga sin mezclarse por la nave dos.

Comportamiento de la temperatura

La presencia del cultivo reduce la cantidad de flujo de energía del suelo hacia el ambiente debido a

In either of the scenarios of open windows, for the simulated environmental conditions, specific areas of heat were identified, making it possible to propose hypotheses for their control.

Opening windows in combination produces relatively small thermal leaps, proving that a 90 m long batimental greenhouse is a good structure in conditions of moderate winds (5 m s^{-1} or more) and deficient if winds are weak. It was also verified that opening roof windows windward reduces the temperature more (Figure 12A), although thermal uniformity is less (Figure 12B). Furthermore, the combination of lateral and roof ventilation produces a notable heat reduction regardless of the orientation of the roof windows (Figure 12 C and D). However, a longitudinal gradient of temperature is created, making it recommendable to make the greenhouse narrower (12 C and D).

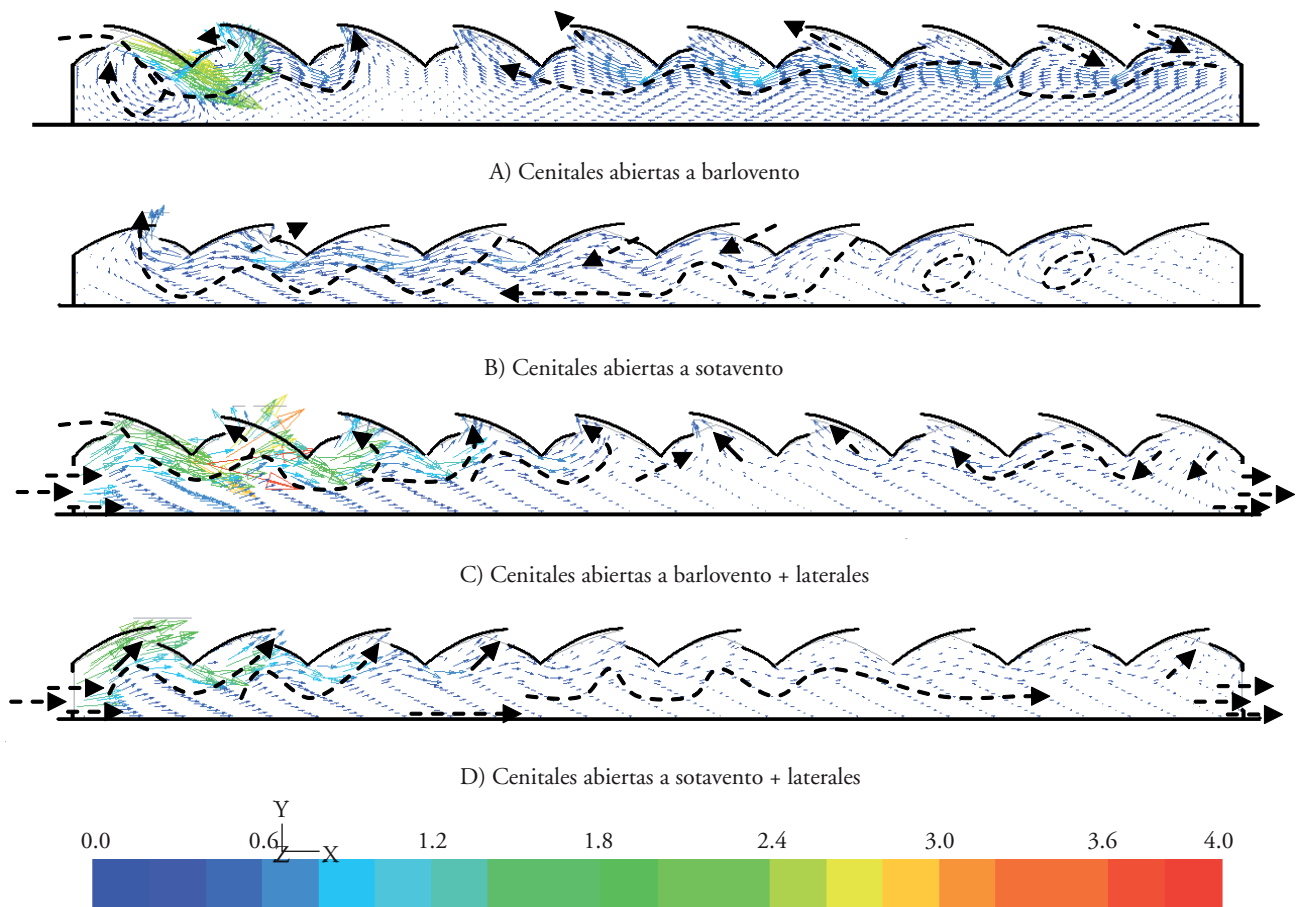


Figura 10. Vectores de velocidad del viento interior (m s^{-1}), con velocidad exterior 5 m s^{-1} , y cuatro escenarios simulados.
Figure 10. Interior wind speed vectors (m s^{-1}) with outside wind speed 5 m s^{-1} , and four simulated scenarios.

la transpiración del cultivo, lo que implica menores gradientes de temperatura ambiental, esto muestra la importancia específica de la ventilación cenital ya que, combinada con la transpiración del cultivo, esta ventilación es capaz de mantener niveles homogéneos de temperatura en la zona de cultivo (1 a 2 m), con velocidades de viento exterior de 3 a 5 m s⁻¹. Con velocidades de viento menores a 3 m s⁻¹ la ventilación cenital produce saltos térmicos del orden de 10 °C en las zonas centrales del invernadero (Figura 11 A y B).

La combinación de la ventilación lateral con la cenital es una opción recomendable para estructuras más cortas, ya que existe una tendencia a incrementar los gradientes térmicos a medida que el aire que entra se aleja de la ventana frontal (Figura 11 C y D).

Las zonas de temperatura mayor con velocidad de viento exterior de 5 m s⁻¹ están en la superficie del

CONCLUSIONS

In a greenhouse with the characteristics shown and under the environmental conditions of central Mexico (San Luis Potosí), climate management involves a combination of open windows to reduce temperature gradients.

With outdoor wind speed of 3 m s⁻¹ and 296 °K, it is possible to reduce the gradients to 5 K by reducing the number of naves until 60 m long. With wind speeds above 4 a 5 m s⁻¹, the roof windows increase air exchange and, consequently, homogenize thermal spatial distribution. If wind speeds are below 4 m s⁻¹, a better option would be to open both lateral and roof windows windward.

In 10-span cenital greenhouses, lateral ventilation dominates over roof ventilation, and thus orientation

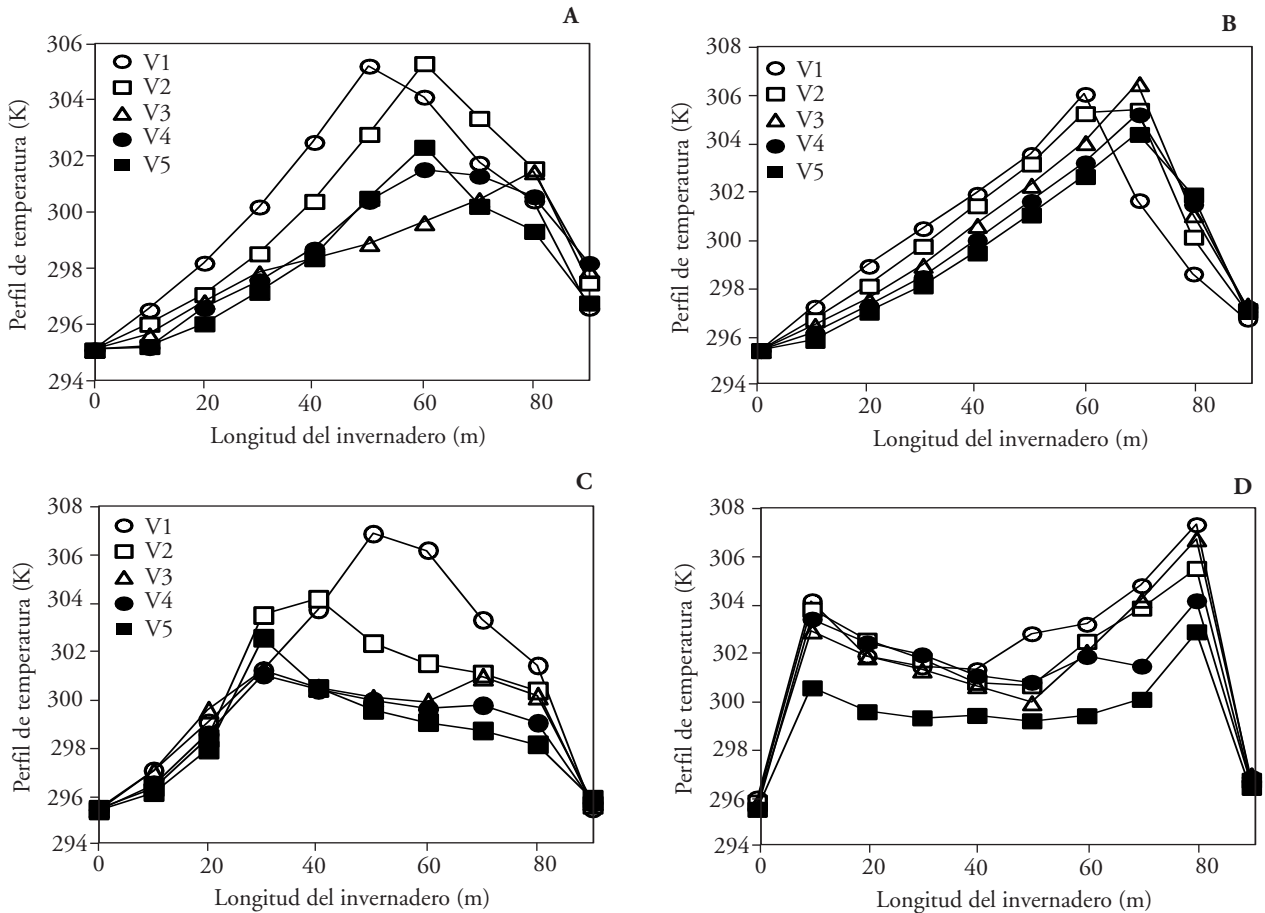


Figura 11. Perfil longitudinal de temperatura (K) a 2 m y en el eje de simetría, velocidades del viento exterior de 1 a 5 ms⁻¹. A) ventanas cenitales abiertas a barlovento, B) a sotavento, C) cenitales abiertas a barlovento + laterales y D) cenitales a sotavento + laterales.

Figure 11. Longitudinal temperature profile (K) at 2 m and on the symmetry axis. Outside wind speed 1 to 5 ms⁻¹. A) roof windows open windward, B) leeward, C) roof windows open windward + lateral windows, and D) roof windows leeward + lateral windows.

suelo, ya que el suelo constituye la única fuente de calor en el modelo de simulación numérica (Figura 12).

La Figura 13 muestra una perspectiva tridimensional, vista en planta, del campo de temperatura a 2 m de altura, de dos de las configuraciones estudiadas, ventanas cenitales abiertas a barlovento (Figura 13A) y sotavento (Figura 13B). En cualquiera de los escenarios de apertura de ventanas, para las condiciones ambientales simuladas, existen zonas puntuales de calor identificadas y con ello la posibilidad de plantear hipótesis para su control.

La combinación de apertura de ventanas produce saltos térmicos relativamente reducidos, lo que prueba que el invernadero baticenital de 90 m de ancho es una buena estructura en condiciones de vientos moderados (5 m s^{-1} o mayores) y deficiente si existen vientos débiles. También se verifica que la apertura de las ventanas cenitales a barlovento reducen más

of open roof windows is irrelevant. The 3-dimensional numerical analysis (CFD) enabled an overall vision of wind spatial distribution inside the greenhouse and inference of its climatic characteristics.

—End of the English version—

-----*

la temperatura (Figura 12A), aunque la uniformidad térmica es menor (Figura 12B), y que la combinación de ventilación lateral y cenital produce una reducción térmica notable independientemente de la orientación de las ventanas del techo (Figura 12 C y D) aunque se crea un gradiente longitudinal de temperatura que hace recomendable acortar el ancho del invernadero (Figura 12 C y D).

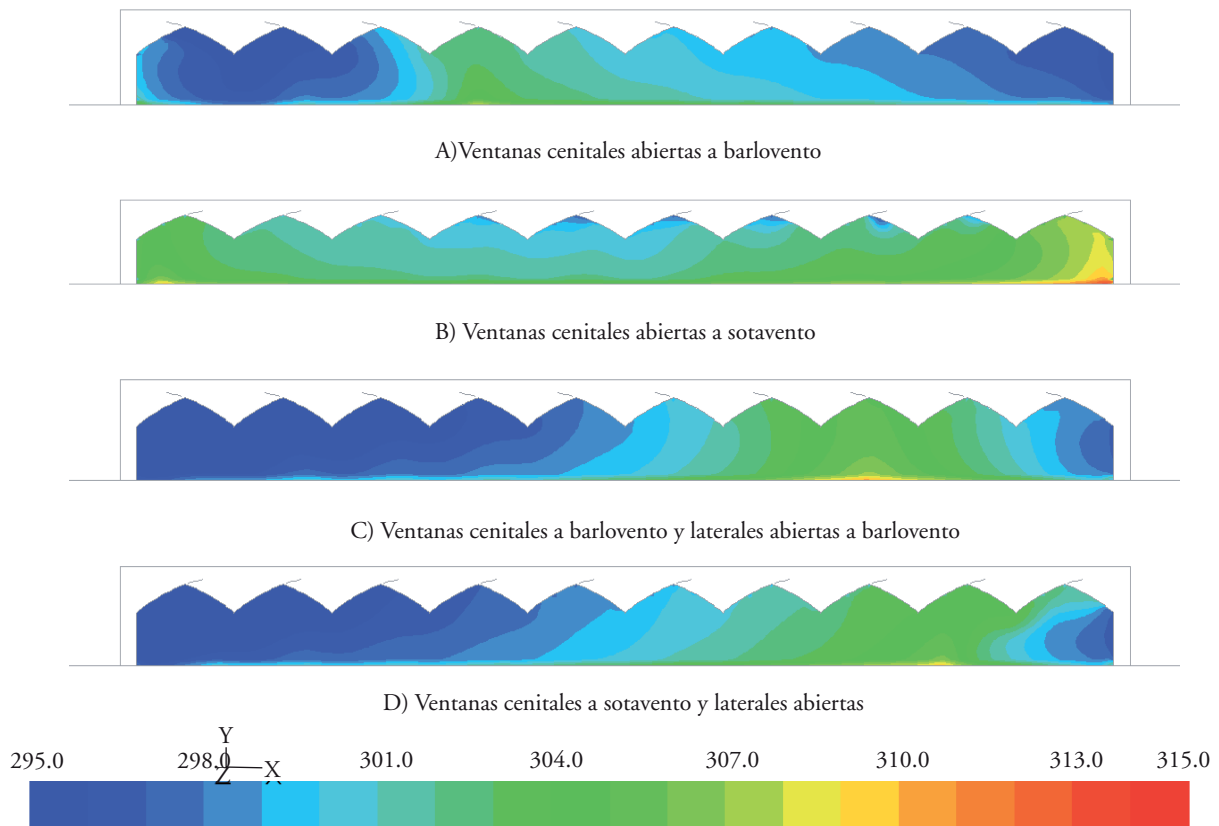


Figura 12. Perfil vertical de temperaturas (K) en el centro del invernadero (eje simétrico) cuando en el exterior se simula 5 m s^{-1} de velocidad del viento, cuatro escenarios de apertura de ventanas.

Figure 12. Vertical temperature profile (K) in the center of the greenhouse (symmetric axis) when on the outside 5 m s^{-1} wind speed is simulated, four scenarios of open windows.

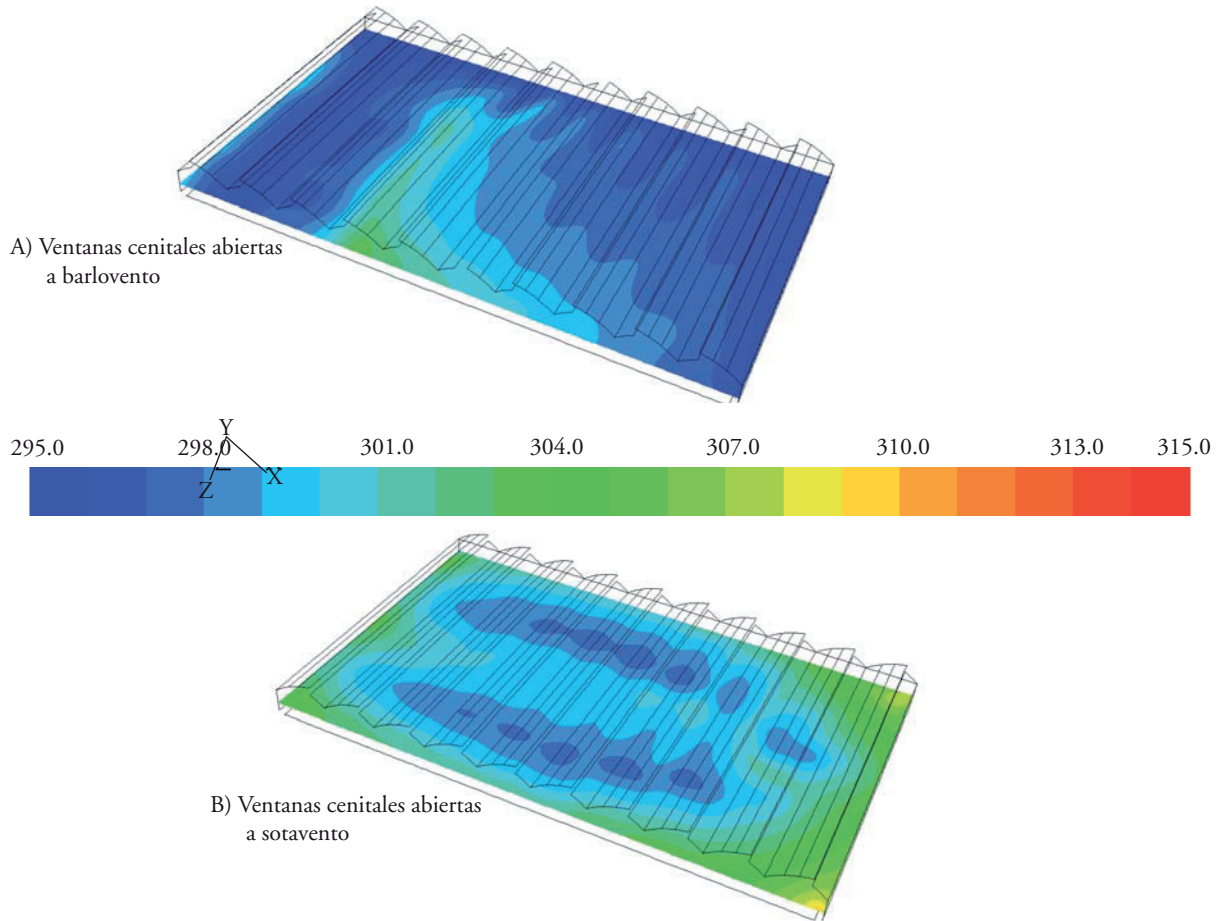


Figura 13. Vista en planta de la distribución espacial de gradientes de temperatura (K) medidos a 2 m del suelo, simulando velocidad del viento exterior de 5 m s^{-1} .

Figure 13. Top view of the spatial distribution of temperature gradients (K) measured 2 m from the ground, simulating 5 m s^{-1} exterior wind speed.

CONCLUSIONES

En un invernadero con las características mostradas y en condiciones ambientales del centro de México (San Luis Potosí), el manejo del clima involucra la combinación de apertura de ventanas para reducir gradientes de temperatura.

Con velocidad del viento exterior de 3 m s^{-1} y 296 °K , es posible abatir los gradientes a 5 K reduciendo el número de naves a 60 m . Con velocidades de viento mayores de 4 a 5 m s^{-1} , las ventanas cenitales incrementan el intercambio de aire y en consecuencia homogeniza la distribución espacial térmica. Si las velocidades del viento son menores a 4 m s^{-1} , una mejor opción es abrir las ventanas laterales y cenitales a barlovento.

En invernaderos baticenitales de 10 naves, la ventilación lateral domina sobre la cenital, por lo que no es relevante orientar la apertura de ventanas cenitales. El análisis numérico (CFD) 3-dimensional permite una visión global de la distribución espacial del viento en el interior del invernadero y con ello inferir sus características climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT-México por los apoyos otorgados en esta investigación

LITERATURA CITADA

Anderson, Jr., J. D. 1995. Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications. Mc. Graw-Hill. USA. 328 p.

- Baeza, E. J., J. J. Pérez-Parra, J. I. Montero, B. J. Bayley, J. C. Lopez, and J. C. Gázquez. 2009. Analysis of the role of side wall vents on buoyancy-driven natural ventilation in multi-span type greenhouses, with and without insect screen using Comput. Fluid Dynamics. *Biosyst. Eng.* 104: 86-96.
- Bailey, B. J. 1995. Greenhouse climate control-new challenges. *Acta Horticulturae*. 399: 13-24.
- Boulard, T., and S. Wang. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Comput. Electron. Agr.* 34: 173-190.
- Flores-Velázquez, J., E. Mejía, J. I. Montero, and A. Rojano. 2011. Numerical analysis of the inner climate in a mechanically-ventilated greenhouse with three spans. *Agrociencia* 45: 545-560.
- García, E. 2003. Distribución de la precipitación en la republica mexicana. *Investigaciones Geográficas* 050: 67-76.
- Haxaire, R. 1999. Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre. [Characterisation and modelling of the air flows within a greenhouse.] Thèse de Docteur en Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Nice, Sophia Antipolis, 148 p.
- Hunt, G. R., and P. F. Linden. 1997. Laboratory modelling of natural ventilation flows driven by the combined forces of buoyancy and wind. *Proc. Chartered Institute of Building Services Eng. National Conf.* 1: 101-107.
- Kittas C., M. Karamanci, and N. Katsoulas. 2005. Air temperature in a forced ventilation greenhouse with rose crop. *Energy Build.* 37: 807-812.
- Lee, I. B. and T.H. Short. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Trans. ASABE*. 43: 745-753.
- Mistriotis, A., T. de Jong, M. J. M. Wagemans. and G. P. A. Boot. 1997. Computational fluids dynamics as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural building. *Neth. J. Agric. Sci.* 45: 81-96.
- Montero, J. I., G. R. Hunt, R. Kamarudddin, A. Anton, and B.J. Bailey. 2001. Effect of ventilator configuration on wind driven ventilation in a crop protection structure for the tropics. *J. Agric. Eng. Res.* 80: 99-107.
- Norton, T., D. W. J. Grant, R. Fallon, and V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresour. Tech.* 98: 2386-2414.
- Ould, K. S. A., P. E Bournet, C. Migeon, T. Boulard, and G. Chasseriaux. 2006. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Byosist. Eng.* 95(1): 83-98.
- Short, T. H., I. Lee, and R.R. Stowell. 2001. Naturally ventilated greenhouse designs for optimum cooling. *Acta Horticulturae* 559: 177-182.
- Reichrath, S., and T. W. Davies. 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. *Agronomie* 22: 3-19
- Willits, D. H., S. Li, and C. A Yunker. 2006. The cooling performance of natural ventilated greenhouse in the southeastern US. *Proc. Int. Symp. Greenhouse Cooling. Acta Horticulturae* 719: 73-80.