

TASAS DE VENTILACIÓN NATURAL DE UN INVERNADERO DEL CENTRO DE MÉXICO ESTIMADAS MEDIANTE BALANCE DE ENERGÍA

NATURAL VENTILATION RATES OF A GREENHOUSE AT CENTRAL MÉXICO ESTIMATED BY ENERGY BALANCE

Agustín Ruiz-García^{1*}, Irineo L. López-Cruz¹, Ramón Arteaga-Ramírez², J. Armand. Ramírez-Arias¹

¹Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, ²Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, 56230, Chapingo, Estado de México. (aruiz@correo.chapingo.mx).

RESUMEN

Las temperaturas diurnas del aire durante los meses de verano en los invernaderos de nivel tecnológico bajo y medio en México son mayores a las óptimas de los cultivos y se necesita de enfriamiento para evitar estrés del cultivo debido al exceso de calor. Aunque la ventilación natural es el principal mecanismo para controlar el clima en la mayoría de estos invernaderos, la información sobre su desempeño es escasa. El objetivo del presente estudio fue determinar, mediante el método de balance de energía, las tasas de ventilación natural de un invernadero tipo sierra equipado con malla anti-insectos en las ventanas. Además, un modelo matemático teórico de tasas de ventilación en función de la velocidad de viento exterior fue ajustado a datos experimentales. El invernadero está ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, México, y se estudió con un cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) bajo un sistema hidropónico y sin cultivo. Los parámetros del modelo de ventilación se estimaron con el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales. Los resultados mostraron que las tasas de ventilación fueron más altas cuando las velocidades del viento fueron mayores y sin cultivo. Las mallas instaladas en las ventanas causan una reducción de 48 % en las tasas de ventilación. El modelo teórico de ventilación predijo de manera aceptable las tasas de ventilación de acuerdo con los índices estadísticos de coeficiente de determinación y raíz cuadrada del error cuadrático medio.

Palabras clave: Malla anti-insecto, modelo, estimación, parámetro, *Cucumis melo* L.

INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos en ambientes protegidos en México ha aumentado a una tasa alta en las dos décadas recientes, principalmente en

ABSTRACT

The daytime air temperatures during the summer months in greenhouses of low and medium technological level in México are higher than the optimum levels of the crops, and require cooling to avoid crop stress from heat. Although natural ventilation is the principal mechanism for controlling climate in most of these greenhouses, information of their performance is scarce. The objective of the present study was to determine, by means of the energy balance method, the natural ventilation rates of a sierra type greenhouse equipped with insect screens in windows. In addition, a theoretical mathematical model of ventilation rates as a function of exterior wind velocity was adjusted to experimental data. The greenhouse is located at the experimental field of the Universidad Autónoma Chapingo, in Chapingo, México. The study was carried out with a melon crop (*Cucumis melo* L.) under a hydroponic system and without cultivation. The parameters of the ventilation model were estimated with the algorithm of non-linear least squares. Results showed that the ventilation rates were higher when wind velocities were higher and without cultivation. The screens installed in the windows caused a reduction in ventilation rates of 48%. The theoretical ventilation model made an acceptable prediction of the ventilation rates according to the statistical indices of determination coefficients and square root of the mean squared error.

Key words: Insect screen, model, estimation, parameter, *Cucumis melo* L.

INTRODUCTION

Crop production in protected environments in México has increased at a high rate in the last two decades, principally in greenhouses with plastic covering and shade houses (Van 't Ooster *et al.*, 2008). The climatic characteristics of the regions

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2014. Aprobado: septiembre, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 87-100. 2015.

invernaderos con cubierta de plástico y casas sombra (Van 't Ooster *et al.*, 2008). Las características climáticas de las regiones donde se concentran las superficies de invernaderos, con alta radiación solar y elevadas temperaturas, provocan que durante el verano se produzcan calentamientos excesivos que afectan el rendimiento y la calidad de los cultivos, por lo cual es necesario enfriar del ambiente. En la mayoría de los invernaderos mexicanos el principal mecanismo para enfriar el ambiente es la ventilación natural (Romero-Gomez *et al.*, 2008). Este es un proceso fundamental que influye en el clima interior del invernadero y en la concentración de gases; y, en consecuencia, influye fuertemente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Boulard *et al.*, 1996). La eficiencia de la ventilación natural depende de la velocidad del viento y de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero (Kittas *et al.*, 1997; Katsoulas *et al.*, 2006). La instalación de mallas en las ventanas, como una barrera física para evitar la entrada de insectos nocivos, es una práctica común en México, pero estas mallas son un obstáculo para el flujo de aire (Valera *et al.*, 2006).

Las tasas de ventilación natural en invernaderos se estiman aplicando varios métodos: gases trazadores (Fatnassi *et al.*, 2002; Kittas *et al.*, 2002), balance de energía (Wang y Deltour, 1996; Demrati *et al.*, 2001; Majdoubi *et al.*, 2007), balance de vapor de agua (Teitel *et al.*, 2008; Mashonjowa *et al.*, 2010) y balance de dióxido de carbono (Romero-Gomez *et al.*, 2008). En invernaderos grandes el método de gas trazador, que es el más usado, presenta varias desventajas y, según Demrati *et al.* (2001), el mezclado del gas presenta la mayor fuente potencial de error. Este problema es muy significativo si el volumen del invernadero es grande en combinación con una tasa baja de ventilación natural y con cultivos en el invernadero. Shilo *et al.* (2004), Katsoulas *et al.* (2006) y Teitel *et al.* (2008) reportan una buena concordancia entre las tasas de ventilación estimadas con los métodos de gas trazador y balance de energía.

En México hay pocos estudios sobre el comportamiento de la ventilación natural en los invernaderos. Romero-Gomez *et al.* (2008) analizaron las tasas de ventilación de un invernadero cenital de tres naves ventilado naturalmente, en Chapingo, México, y encontraron que fueron bajas comparadas con las recomendadas por Jones (2008), y combinado con las condiciones del clima local, produjeron altas temperaturas del aire interior. Además, Espejel y López

where greenhouse surfaces are concentrated, with high solar radiation and high temperatures, cause overheating in summer, affecting crop yield and quality, thus it is necessary to cool the environment. In most Mexican greenhouses the principal mechanism for cooling the environment is natural ventilation (Romero-Gomez *et al.*, 2008). This is a fundamental process that influences the interior climate of the greenhouse and the concentration of gases, and consequently has a strong influence on crop growth and development (Boulard *et al.*, 2008). The efficiency of natural ventilation depends on wind velocity and the on temperature difference between the inside and the outside of the greenhouse (Kittas *et al.*, 1997; Katsoulas *et al.*, 2006). The installation of screens in the windows, as a physical barrier to prevent the entrance of insects is a common practice in México, but these screens are an obstacle for air flow (Valera *et al.*, 2006).

Natural ventilation rates in greenhouses are estimated by applying various methods: tracer gases (Fatnassi *et al.*, 2002; Kittas *et al.*, 2002), energy balance (Wang and Deltour, 1996; Demrati *et al.*, 2001; Majdoubi *et al.*, 2007), water vapor balance (Teitel *et al.*, 2008; Mashonjowa *et al.*, 2010) and carbon dioxide balance (Romero-Gomez *et al.*, 2008). In large greenhouses the tracer gas method, which is the most often used, presents various disadvantages, and according to Demrati *et al.* (2001) the gas mixture presents the highest potential source of error. This problem is very significant if the volume of the greenhouse is large in combination with a low rate of natural ventilation and with crops in the greenhouse. Shilo *et al.* (2004), Katsoulas *et al.* (2006) and Teitel *et al.* (2008) report good concordance between ventilation rates estimated with gas tracer methods and energy balance.

There are few studies in México of the behavior of natural ventilation in greenhouses. Romero-Gomez *et al.* (2008) analysed the ventilation rates of a zenithal greenhouse of three naves with natural ventilation in Chapingo, México, and found that they were low compared with those recommended by Jones (2008), and combined with the conditions of the local climate, produced high temperatures of inside air. Furthermore, Espejel and López (2013) determined the natural ventilation rates of a tunnel greenhouse without crops in Chapingo, and the most efficient combination was that of openings lateral and zenithal windows.

(2013) determinaron las tasas de ventilación natural de un invernadero tipo túnel sin cultivo en Chapingo, y la combinación más eficiente fue la de apertura de ventanas laterales y cenitales.

Una mejor comprensión del comportamiento de la ventilación natural es fundamental para mejorar el diseño y manejo de los invernaderos y así proporcionar las condiciones ambientales óptimas para el crecimiento de los cultivos. Por tanto, el objetivo de este estudio fue determinar las tasas de ventilación natural de un invernadero tipo sierra y cuantificar la reducción en las tasas de ventilación causada por la malla anti-insecto instalada en las ventanas; estos datos ayudarán a mejorar el manejo y optimizar el diseño de este tipo de invernaderos. Además, se calibró un modelo matemático de tasas de ventilación para incorporarlo en un modelo dinámico del microclima del invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del experimento

El estudio se realizó en un invernadero ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, México, a 19° 29' N, 98° 53' O, y a una altitud de 2240 m. El invernadero es de tipo sierra formado por tres naves de estructura metálica, con orientación SO-NE, tiene 75.5 m de largo por 25.5 m de ancho, una altura de 6.48 m a la cumbre, y un volumen de 11295.56 m³ (Figura 1). Su ventilación fue por ventanas cenitales de 221.18 m² y laterales de 368.56 m² que se abren al enrollar la película de polietileno por medio de motoredutores. Las primeras están orientadas hacia el oeste, en dirección de los vientos dominantes. Además, tienen malla anti-insecto. La cubierta es una película de polietileno con tratamiento ultravioleta de 180 µm de espesor. Está rodeado al este y al norte por invernaderos tipo túnel de 5.8 m de altura.

Las mediciones se realizaron de abril a octubre de 2012. En la primera semana de abril se estableció un cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) en hidroponía con cinco cultivares (honeydew, cantaloup, galia, amarillo y piel de sapo). Los frutos fueron cosechados y las plantas retiradas del invernadero el 15 de septiembre. En el cultivo se realizó entutorado, deshojes, podas y raleo. La polinización se efectuó por medio de una colmena de abejas. La densidad del cultivo fue de 2 plantas m⁻². El agua y los fertilizantes fueron aplicados por un sistema automatizado de fertirriego por goteo.

Las variables climáticas en el interior fueron medidas en el área central del invernadero como se describe a continuación. La

A major comprehension of the behavior of natural ventilation is fundamental for improving the design and management of greenhouses and thus provide the optimal environmental conditions for crop growth. Therefore, the objective of this study was to determine the natural ventilation rates of a sierra greenhouse and to quantify the reduction in ventilation rates caused by the insect screens installed in the windows; these data will help to improve the management and optimize the design of this type of greenhouse. Additionally, a mathematical model of ventilation rates was calibrated to be incorporated in a dynamic model of the microclimate of the greenhouse.

MATERIALS AND METHODS

Description of the experiment

The study was conducted in a greenhouse located in the experimental field of the Universidad Autónoma Chapingo, México, at 19° 29' N, 98° 53' W, and at an altitude of 2240 m. The greenhouse is of the sierra type formed by three naves of metallic structure, with SW-NE orientation. Its length is 75.5 m by 25.5 m width, with a height of 6.48 m at the ridge, and a volume of 11295.56 m³ (Figure 1). Its ventilation was by means of zenithal windows of 221.18 m² and lateral windows of 368.56 m², which open by rolling the polyethylene film by means of gearmotors. The zenithal windows are oriented toward the west, in the direction of the prevailing winds. Furthermore, they have insect screens. The cover is a polyethylene film with ultra-violet treatment with a thickness of 180 µm. It is surrounded to the east and the north by tunnel type greenhouses of 5.8 m height.

The measurements were made from April to October of 2012. In the first week of April, a melon crop (*Cucumis melo* L.) was established in hydroponics with five cultivars (honeydew, cantaloupe, galia, yellow and toad skin). The fruits were harvested and the plants were removed from the greenhouse on September 15. Cultural tasks carried out were tutoring, leaf stripping, pruning and thinning. Pollination was performed by means of a beehive. Crop density was 2 plants m⁻². Water and fertilizers were applied by an automated drip system.

Inside climatic variables were measured in the central area of the greenhouse with the equipment as described below. Net radiation was measured with a CNR 2 net radiometer (Kipp and Zonen, U.S.A.) and global radiation with a CMP 3 pyranometer (Kipp and Zonen) at a height of 3.5 m from the ground, between

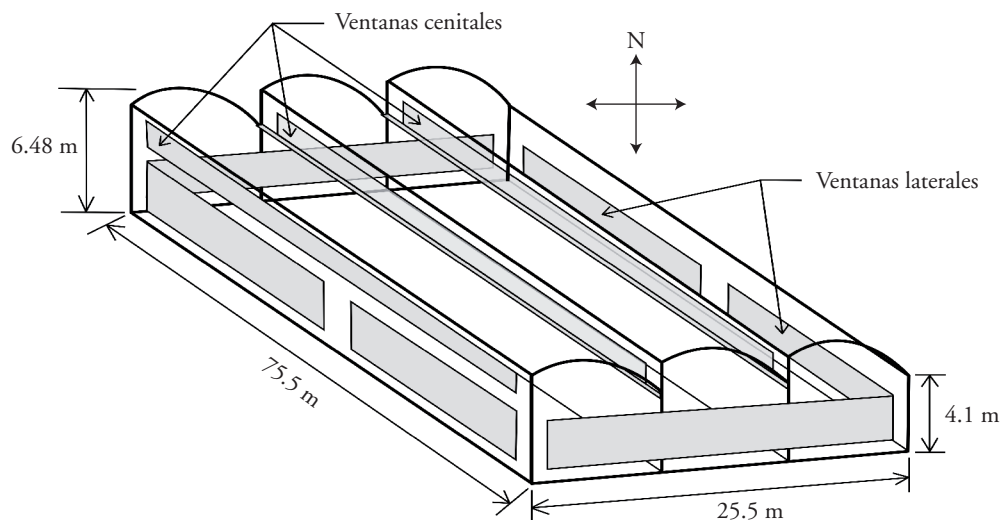


Figura 1. Forma y dimensiones generales del invernadero donde se realizó el estudio.
Figure 1. Form and general dimensions of the greenhouse where the study was made.

radiación neta con un radiómetro neto CNR 2 (Kipp & Zonen, EE.UU.) y la radiación global con un piranómetro CMP 3 (Kipp & Zonen) a una altura de 3.5 m del piso, entre el follaje del cultivo y el plástico de la cubierta del invernadero. La temperatura y humedad relativa del aire con un sensor HMP50 (Vaisala, EE.UU.) a una altura de 1.5 m del piso, localizado dentro de un protector solar aspirado. El flujo de calor del suelo con un sensor HFP01SC (Hukseflux, EE.UU.) situado 5 cm bajo la superficie del suelo. La temperatura del plástico de la cubierta con termopares tipo E de Chromel-Constantan de 0.0762 mm de diámetro FW3 (Campbell Scientific, EE.UU.), situados en la cara interior del plástico de la nave central del invernadero. Dos termopares se colocaron en la cara este y otros dos termopares en la cara oeste, y la temperatura del plástico se consideró igual al valor promedio de los cuatro sensores. Los sensores se conectaron a un data logger CR1000 (Campbell Scientific) para el registro de los datos.

Las variables climáticas en el exterior fueron medidas a una altura de 8.80 m del piso y a 10 m de distancia del invernadero en el lado norte. La temperatura y humedad relativa del aire con un sensor S-TBH-M002 (Onset Computer, EE.UU.) localizada dentro de un protector solar. La radiación solar global con un piranómetro S-LIB-M003 (Onset Computer) orientado hacia el sur. La velocidad del viento con un anemómetro de copa S-WSA-M003 (Onset Computer) y la dirección con una veleta S-WDA-M003 (Onset Computer). Los sensores se conectaron a un data logger Hobo Weather Station (Onset Computer) para el registro de los datos. Las variables del clima dentro y fuera del invernadero se midieron cada 10 s, se promediaron y se guardaron cada minuto en un archivo para su procesamiento posterior.

the crop foliage and the plastic covering of the greenhouse. Temperature and relative humidity of the air were measured with an HMP50 sensor (Vaisala, USA) at a height of 1.5 m from the ground, located within an aspirated solar protector. The heat flow from the soil was measured with an HFP01SC sensor (Hukseflux, USA) placed 5 cm below the soil surface. The temperature of the plastic cover was determined with Chromel-Constantan type E thermocouples of 0.0762 mm diameter FW3 (Campbell Scientific, USA), situated on the inside face of the plastic of the central nave of the greenhouse. Two thermocouples were placed on the east face and another two thermocouples on the west face, and the temperature of the plastic was considered equal to the average value of the four sensors. The sensors were connected to a CR1000 data logger (Campbell Scientific) for registering data.

The climatic variables in the exterior were measured at a height of 8.80 m from the ground and at 10 m distance from the greenhouse on the north side. Temperature and relative humidity of the air were measured with an S-TBH-M002 sensor (Onset Computer, U.S.) located within a solar protector. Global solar radiation was measured with an S-LIB-M003 pyranometer (Onset Computer) oriented toward the south. Wind velocity was measured with an S-WSA-M003 cup anemometer (Onset Computer) and direction with an S-WDA-M003 vane (Onset Computer). The sensors were connected to a Hobo Weather Station data logger (Onset Computer) to register data. The climatic variables inside and outside of the greenhouse were measured every 10 s, were averaged and stored every minute in a file for later processing.

Método de balance de energía para estimar las tasas de ventilación natural

Las tasas de ventilación del invernadero fueron estimadas con el método de balance de energía bajo dos condiciones, con un cultivo de melón y sin cultivo. Los días seleccionados fueron donde las ventanas permanecieron abiertas de 10:00 a 16:00 h, debido a que como práctica de manejo estas fueron cerradas cuando se presentaron lluvias para evitar el ingreso de humedad. Este periodo es suficiente para obtener una buena precisión en la estimación de las tasas de ventilación con el balance de energía (Demrati *et al.*, 2001). Para el primer caso se usaron los datos meteorológicos promedio y de las áreas de ventilación de 13 días, desde el 18 de junio al 25 de julio de 2012; para el segundo, los datos de 11 días, del 11 al 28 de septiembre de 2012. Debido a una falla de los sensores de viento instalados en el exterior del invernadero durante el primer periodo, se usaron los datos registrados en una estación meteorológica automática (Davis, EE.UU.) ubicada a una distancia aproximada de 1 km. En esta estación, los sensores fueron instalados a una altura de 2 m, los valores de la velocidad y dirección del viento fueron promediados y almacenados en el data logger cada 30 min.

El balance de energía de un invernadero es la suma de las ganancias y pérdidas de calor así como del contenido transitorio de energía (Harmanto *et al.*, 2006; Majdoubi *et al.*, 2007), y se pueden usar modelos estáticos o dinámicos (Roy *et al.*, 2002). Los primeros son menos precisos debido a su simplicidad e involucran pocos parámetros, los segundos son mejores en términos de precisión, pero involucran más parámetros. Las tasas de ventilación estimadas con el método de balance de energía, comparadas con el método de gas trazador, son menores debido a una subestimación de la energía almacenada en el sistema (Roy *et al.*, 2002; Shilo *et al.*, 2004). El intercambio de calor entre el interior y el exterior del invernadero es un mecanismo complejo, involucra procesos de radiación, conducción, convección y transferencia de calor latente (Harmanto *et al.*, 2006).

La ecuación de balance de energía en estado estacionario del interior de invernadero usada en este estudio es similar a la descrita por Demrati *et al.* (2001) y Majdoubi *et al.* (2007):

$$R_{net} = Q_{Si,e} + Q_{Si,c} + Q_{Si,w} + Q_{Li,e} + F_s \quad (1)$$

donde R_{net} ($W m^{-2}$) es la radiación neta disponible en el interior de invernadero, $Q_{Si,e}$ ($W m^{-2}$) es el flujo de calor sensible extraído por ventilación, $Q_{Li,e}$ ($W m^{-2}$) es el flujo de calor latente extraído por ventilación, $Q_{Si,e}$ ($W m^{-2}$) es el flujo de calor sensible intercambiado por convección entre el aire interior y la cubierta del invernadero, $Q_{Si,w}$ ($W m^{-2}$) es la pérdida global de energía sensible a través de las paredes, y F_s ($W m^{-2}$) es el flujo de calor a través

Energy balance method for estimating natural ventilation rates

Greenhouse ventilation rates were estimated with the energy balance method under two conditions: with a melon crop and without a crop. The selected days were where the windows remained open from 10:00 to 16:00 h, because as a management practice, they were closed when it rained to prevent the entrance of moisture. This period was long enough to obtain good precision in the estimation of ventilation rates with the energy balance (Demrati *et al.*, 2001). For the first case the average meteorological data were used, and of the ventilation areas of 13 days, from June 18 to July 25 of 2012; for the second, the data of 11 days, from September 11 to 28 of 2012. Due to a failure of the wind sensors installed on the exterior of the greenhouse during the first period, the data registered in an automatic meteorological station were used (Davis, USA) located at a distance of approximately 1 km. In this station, the sensors were installed at a height of 2 m, the values of wind velocity and direction were averaged and stored in the data logger every 30 min.

The energy balance of a greenhouse is the sum of the gains and losses of heat as well as the transitory energy content (Harmanto *et al.*, 2006; Majdoubi *et al.*, 2007), and statistical or dynamic models can be used (Roy *et al.*, 2002). The former are less precise due to their simplicity and involve few parameters, the latter are better in terms of precision, but involve more parameters. The ventilation rates estimated with the energy balance method, compared with the gas tracer method, are lower due to a subestimation of the energy stored in the system (Roy *et al.*, 2002; Shilo *et al.*, 2004). The heat exchange between the inside and outside of the greenhouse is a complex mechanism, involving processes of radiation, conduction, convection and transference of latent heat (Harmanto *et al.*, 2006).

The equation of energy balance in stationary stage of the greenhouse interior used in this work is similar to that described by Demrati *et al.* (2001) and Majdoubi *et al.* (2007).

$$R_{net} = Q_{Si,e} + Q_{Si,c} + Q_{Si,w} + Q_{Li,e} + F_s \quad (1)$$

where R_{net} ($W m^{-2}$) is the net radiation available in the interior of the greenhouse, $Q_{Si,e}$ is the sensitive heat extracted by ventilation, $Q_{Li,e}$ ($W m^{-2}$) is the flow of sensitive heat exchanged by convection between the inside air and the greenhouse cover, $Q_{Si,w}$ ($W m^{-2}$) is the global loss of sensitive energy through the walls, and F_s ($W m^{-2}$) is the flow of heat through the floor. For the greenhouse analyzed, the terms of the energy balance of equation (1) were determined according to Majdoubi *et al.* (2007), as indicated below.

de suelo. Para el invernadero analizado, los términos del balance de energía de la ecuación (1) fueron determinados de acuerdo con Majdoubi *et al.* (2007), como se indica a continuación.

El flujo de calor sensible intercambiado con el exterior por ventilación fue considerado proporcional a la diferencia de temperatura del aire entre el interior T_i (°C) y el exterior T_e (°C), y a la tasa de ventilación G ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$):

$$Q_{Si,e} = K_i (T_i - T_e) \quad (2)$$

con

$$K_S = \rho_a C_p \left[\frac{G}{A_f} \right] \quad (3)$$

donde A_f (m^2) es la superficie del piso del invernadero, ρ_a (kg m^{-3}) es la densidad del aire, y C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$) es el calor específico del aire a presión constante.

El flujo de calor latente extraído por ventilación fue considerado proporcional a la diferencia del contenido de vapor de agua entre el interior y el exterior, y a la tasa de ventilación:

$$Q_{Li,e} = KL(H_i - H_e) \quad (4)$$

donde H_i y H_e (kg kg^{-1}) son las humedades específicas del aire interior y exterior, respectivamente, con:

$$K_L = \rho_a \lambda \left[\frac{G}{A_f} \right] \quad (5)$$

donde λ (J kg^{-1}) es el calor latente de vaporización del agua.

El flujo de calor sensible intercambiado por convección entre el aire interior y la cubierta del invernadero fue considerado proporcional a la diferencia de temperatura entre el plástico de cubierta T_c (°C) y la temperatura del aire interior:

$$Q_{Si,c} = C_h \left[\frac{A_c}{A_f} \right] (T_c - T_i) \quad (6)$$

donde C_b ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$) es el coeficiente de intercambio de calor por convección entre el aire interior y el plástico de la cubierta, que fue estimado con la ecuación propuesta por Wang y Deltour (1996):

The flow of sensitive heat exchanged with the exterior through ventilation was considered proportional to the temperature difference between the interior T_i (°C) and the exterior T_e (°C), and the ventilation rate G ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$):

$$Q_{Si,e} = K_i (T_i - T_e) \quad (2)$$

with

$$K_S = \rho_a C_p \left[\frac{G}{A_f} \right] \quad (3)$$

where A_f (m^2) is the surface of the greenhouse floor, ρ_a (kg m^{-3}) is the air density, and C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$) is the specific heat of the air at constant pressure.

The latent heat flow extracted by ventilation was considered proportional to the difference of the water vapor content between the interior and the exterior, and the ventilation rate:

$$Q_{Li,e} = KL(H_i - H_e) \quad (4)$$

where H_i and H_e (kg kg^{-1}) are the specific humidities of the interior and exterior air, respectively, with:

$$K_L = \rho_a \lambda \left[\frac{G}{A_f} \right] \quad (5)$$

where λ (J kg^{-1}) is the latent heat of water vaporization.

The sensitive heat flow exchanged by convection between the inside air and the greenhouse cover was considered proportional to the difference of temperature between the plastic cover T_c (°C) and the temperature of the interior air:

$$Q_{Si,c} = C_h \left[\frac{A_c}{A_f} \right] (T_c - T_i) \quad (6)$$

where C_b ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$) is the coefficient of the exchange of heat by convection between the interior air and the plastic of the cover, which was estimated with the equation proposed by Wang and Deltour (1996):

$$C_b = 1.759 (T_c - T_i)^{1/3} \quad (7)$$

$$C_b = 1.759 (T_c - T_i)^{1/3} \quad (7)$$

Majdoubi *et al.* (2007) mencionan que cuando la temperatura de las paredes laterales no son medidas, la pérdida global de energía sensible a través de estas se estima con un coeficiente global de pérdida por conducción-convección. Entonces, la pérdida global de calor sensible fue estimada con:

$$Q_{Si,w} = K_c (T_i - T_e) \quad (8)$$

donde K_c ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) es el coeficiente global de pérdida de calor sensible del invernadero a través del plástico de las paredes. El coeficiente K_c es considerado como función de la velocidad del viento: (Boulard y Baille, 1993; Kittas *et al.*, 2002):

$$K_c = a + b W_e \quad (9)$$

donde W_e (m s^{-1}) es la velocidad del viento exterior, a y b son coeficientes empíricos que deben ser estimados. Para el invernadero analizado se consideraron las pérdidas a través de las paredes laterales excluyendo las aberturas de ventilación, esto es, a través de un área de paredes de 776.81 m^2 . De acuerdo con Majdoubi *et al.* (2007), cuando se considera la superficie de piso del invernadero ($A_f = 1925.25 \text{ m}^2$) como superficie unitaria, los coeficientes reportados por Boulard y Baille (1993) ($a = 6$, $b = 0.5$) deben ser multiplicados por $(776.81/1925.25) = 0.40$, obteniendo los siguientes valores: $a = 2.40$ y $b = 0.20$.

Las ecuaciones (2) - (9) al sustituirlas en la ecuación (1) y reagrupando, se obtiene la tasa de ventilación:

$$G = \frac{A_f(R_{net} - F_s) - A_f K_c(T_i - T_e) + (A_c / A_f) C_h(T_c - T_i)}{\rho_a C_p(T_i - T_e) + \lambda(H_i - H_e)} \quad (10)$$

Modelo teórico de la ventilación natural y su calibración

El flujo de aire a través de una abertura es causado por una combinación de diferencias de presión inducido por fuerzas de flotación y de viento (Kittas *et al.*, 1997; Katsoulas *et al.*, 2006). Katsoulas *et al.* (2006) mencionan que para velocidades de viento mayores de 1 a 1.5 m s^{-1} el efecto térmico de flotación puede ignorarse y la tasa de ventilación puede considerarse como una función de la velocidad del viento exterior. Con este supuesto, la tasa de ventilación puede ser calculada con (Kittas *et al.*, 1997; Kittas *et al.*, 2002):

Majdoubi *et al.* (2007) mention that when the temperature of the lateral walls is not measured, the global loss of sensitive energy through them is estimated with a global coefficient of loss through conduction-convection. Hence, the global loss of sensitive heat was estimated with:

$$Q_{Si,w} = K_c (T_i - T_e) \quad (8)$$

where K_c ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) is the global coefficient of sensitive heat loss of the greenhouse through the plastic of the walls. The coefficient K_c is considered by various authors as a function of the wind velocity (Boulard and Baille, 1993; Kittas *et al.*, 2002):

$$K_c = a + b W_e \quad (9)$$

where W_e (m s^{-1}) is the exterior wind velocity, a and b are empirical coefficients that must be estimated. For the greenhouse analyzed, losses through the lateral walls were considered excluding the vent openings, that is, through an area of walls of 776.81 m^2 . According to Majdoubi *et al.* (2007), when the greenhouse floor surface is considered ($A_f = 1925.25 \text{ m}^2$) as a unitary surface, the coefficients reported by Boulard and Baille (1993) ($a = 6$, $b = 0.5$) should be multiplied by $(776.81/1925.25) = 0.40$, obtaining the following values: $a = 2.40$ and $b = 0.20$.

The equations (2) - (9) when substituted in the equation (1) and regrouping, give the following ventilation rate:

$$G = \frac{A_f(R_{net} - F_s) - A_f K_c(T_i - T_e) + (A_c / A_f) C_h(T_c - T_i)}{\rho_a C_p(T_i - T_e) + \lambda(H_i - H_e)} \quad (10)$$

Theoretical model of natural ventilation and its calibration

The flow of air through an opening is caused by a combination of differences of pressure induced by forces of flotation and of wind (Kittas *et al.*, 1997; Katsoulas *et al.*, 2006). Katsoulas *et al.* (2006) mention that for wind velocities higher than 1 to 1.5 m s^{-1} the thermal effect of flotation can be ignored and the ventilation rate can be considered as a function of the exterior wind velocity. With this assumption, the ventilation rate can be calculated with (Kittas *et al.*, 1997; Kittas *et al.*, 2002):

$$G = \left(\frac{A_v}{2} \right) C_{dR} C_w^{0.5} W_e \quad (11)$$

$$G = \left(\frac{A_v}{2} \right) C_{dT} C_w^{0.5} W_e \quad (11)$$

donde G ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) es la tasa de ventilación, A_v (m^2) es el área total de la abertura de ventilación, C_{dt} (adimensional) es un coeficiente de descarga de la abertura, y C_w (adimensional) es un coeficiente presión de viento. Para realizar comparaciones entre diferentes invernaderos, es necesario expresar la tasa de ventilación por unidad de área de piso denotado por ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Para realizar la calibración se planteó un problema de optimización, usando el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales para estimar los valores del coeficiente global de eficiencia de ventilación E_v , definido como $E_v = C_{dT} C_w^{0.5}$. La función a minimizar fue:

$$f(E_v) = \sum_{i=1}^N G_{f,cal}(i) - G_{f,est}(i)^2 \quad (12)$$

donde $G_{f,est}$ es la tasa de ventilación estimada con el balance de energía, $G_{f,cal}$ es la tasa de ventilación calculada con el modelo teórico de ventilación y N es el número de datos (con cultivo $N=13$ y sin cultivo $N=11$). El problema de optimización se resolvió mediante la rutina lsqnonlin del Optimization toolbox de Matlab (The Mathworks). La calidad de las predicciones del modelo de ventilación fue evaluada con los estadísticos de error medio absoluto (MAE), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación (R^2).

Determinación del coeficiente de descarga de la malla

En una abertura con mallas el coeficiente C_{dT} en la ecuación (11) se calcula como (Kittas *et al.*, 2002):

$$C_{dT} = \frac{C_d C_s}{(C_d^2 + C_s^2)^{0.5}} \quad (13)$$

donde C_s (adimensional) es el coeficiente de descarga de la malla y C_d es el coeficiente de descarga sin malla. En este estudio, el coeficiente C_s fue determinado con la expresión propuesta por Brundrett (1993; citado por Fatnassi *et al.*, 2009):

$$C_s = \frac{0.026 \varphi^{1.465}}{d_h^{0.5}} \quad (14)$$

where G ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) is the ventilation rate, A_v (m^2) is the total area of the vent opening, C_{dt} (adimensional) is a coefficient of discharge of the opening, and C_w (adimensional) is a wind pressure coefficient. To make comparisons between different greenhouses, it is necessary to express the ventilation rate per unit of the floor area denoted by ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

To carry out calibration, an optimization problem was proposed, using the procedure of non-linear least squares to estimate the values of the global coefficient of ventilation efficiency E_v , defined as $E_v = C_{dT} C_w^{0.5}$. The function to minimize was:

$$f(E_v) = \sum_{i=1}^N G_{f,cal}(i) - G_{f,est}(i)^2 \quad (12)$$

where $G_{f,est}$ is the ventilation rate estimated with the energy balance, $G_{f,cal}$ is the ventilation rate calculated with the theoretical ventilation model and N is the number of data (with crop $N=13$ and without crop $N=11$). The optimization problem was solved through the lsqnonlin routine of the Optimization toolbox of Matlab (The Mathworks). The quality of the predictions of the ventilation model was evaluated with the statistics of mean absolute error (MAE), square root of the mean square error (RMSE) and determination coefficient (R^2).

Determination of the screen discharge coefficient

In an opening with screens, the coefficient C_{dT} in equation (11) is calculated as (Kittas *et al.*, 2002):

$$C_{dT} = \frac{C_d C_s}{(C_d^2 + C_s^2)^{0.5}} \quad (13)$$

where C_s (adimensional) is the coefficient of the screen discharge and C_d is the discharge coefficient without a screen. In this study, the coefficient C_s was determined with the expression proposed by Brundrett (1993; cited by Fatnassi *et al.*, 2009):

$$C_s = \frac{0.026 \varphi^{1.465}}{d_h^{0.5}} \quad (14)$$

where φ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) is the porosity of the screen and d_h (m) is the average diameter of the screen threads. The porosity expresses the relationship between the superficial area of the pores and the total area of the screen (Valera *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2012):

donde φ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) es la porosidad de la malla y d_h (m) es el diámetro promedio de los hilos de la malla. La porosidad expresa la relación entre el área superficial de los poros y el área total de la malla (Valera *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2012):

$$\varphi = \frac{L_{px}L_{py}}{(L_{px} + d_h)(L_{py} + d_h)} \quad (15)$$

con

$$L_{px} = \frac{1}{\rho_y} - d_h; L_{py} = \frac{1}{\rho_x} - d_h \quad (16)$$

donde L_{px} y L_{py} (m) son las longitudes promedio de los poros en las dos direcciones principales; ρ_x y ρ_y (hilos m^{-1}) representan el número de hilos por unidad de longitud en cada una de las dos direcciones principales.

Para estimar la porosidad de la malla con las ecuaciones (15) y (16), se tomaron cuatro muestras. De éstas se midieron los diámetros de los hilos y se determinó el número de hilos en las dos direcciones principales con un microscopio óptico DM500 (Leica Microsystems) con una cámara de 3 megapíxeles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan las condiciones ambientales prevalecientes durante el periodo donde se realizaron los balances de energía del invernadero para estimar las tasas de ventilación natural. La Figura 2 presenta las tasas de ventilación del invernadero estimadas con el método de balance de energía en función de la velocidad del viento. La ecuación de la curva de regresión lineal obtenida para el invernadero con cultivo es $G_f = 0.017W_e + 0.0062$ ($R^2=0.65$), y sin cultivo es ($R^2=0.86$). En ambos casos, las tasas de ventilación fueron más altas cuando las velocidades del viento fueron mayores y sin cultivo. Estos resultados concuerdan con los de Romero-Gomez *et al.* (2008) y Espejel y López (2013) quienes reportan una fuerte dependencia de las tasas de ventilación con la velocidad del viento para invernaderos en la misma región.

Las tasas de ventilación estimadas para el invernadero, con la combinación de ventilación lateral y cenital fueron relativamente bajas. Jones (2008) recomienda una ventilación mínima de un intercambio por minuto (equivalente a $9.78 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para el invernadero de este estudio) con el objeto de

$$\varphi = \frac{L_{px}L_{py}}{(L_{px} + d_h)(L_{py} + d_h)} \quad (15)$$

with

$$L_{px} = \frac{1}{\rho_y} - d_h; L_{py} = \frac{1}{\rho_x} - d_h \quad (16)$$

where L_{px} and L_{py} (m) are the average lengths of the pores in the two principal directions; ρ_x and ρ_y (threads m^{-1}) represent the number of threads per unit of length in each one of the two principal directions.

To estimate the porosity of the screen with the equations (15) and (16), four samples of each were taken. From these samples, the diameters of the threads were measured and the number of threads in the two principal directions was determined with a DM500 optical microscope (Leica Microsystems) with a camera of 3 megapixels.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 presents the environmental conditions prevailing during the period when the energy balances of the greenhouse were made for estimating the natural ventilation rates. Figure 2 presents the ventilation rates of the greenhouse estimated with the energy balance method as a function of wind velocity. The equation of the linear regression curve obtained for the greenhouse with crop is $G_f = 0.017W_e + 0.0062$ ($R^2=0.65$), and without crop is ($R^2=0.86$). In both cases, ventilation rates were higher when wind velocities were higher and without a crop. These results concur with those of Romero-Gomez *et al.* (2008) and Espejel and López (2013) who report a strong dependence of the ventilation rates with the wind velocity for greenhouses in the same region.

The ventilation rates estimated for the greenhouse, with the combination of lateral and zenithal ventilation were relatively low. Jones (2008) recommends a minimum ventilation of an exchange per minute (equivalent to $9.78 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for the greenhouse of this study) with the purpose of mitigating the high temperatures of the interior air resulting from the intense solar radiation during the summer months. From the equation of regression among the ventilation rates and wind velocity for

Cuadro 1. Valores de mínima, máxima y promedio de variables ambientales en el interior y exterior del invernadero en el periodo diurno en que se realizó el balance de energía, para el caso con cultivo (13 días) y sin cultivo (11 días), durante el verano de 2012.

Table 1. Values of minimum, maximum and average of environmental variables in the interior and exterior of the greenhouse in the daytime period in which the energy balance was made, for the case with crop (13 days) and without crop (11 days), during the summer of 2012.

Variable	Con cultivo			Sin cultivo		
	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio
Radiación solar global (W m^{-2})	98.1	1214.4	549.7	45.6	1034.4	612.5
Radiación neta (W m^{-2})	50.8	904.0	384.2	-19.2	515.2	289.0
Flujo de calor en suelo (W m^{-2})	0.0	97.6	32.8	11.5	97.7	64.5
Velocidad de viento exterior (m s^{-1})	0.4	3.1	1.6	0.0	6.0	2.1
Velocidad de viento interior (m s^{-1})	0.01	0.97	0.24	0.04	0.90	0.33
Temperatura del aire exterior ($^{\circ}\text{C}$)	14.1	24.8	19.3	14.8	26.5	22.4
Temperatura del aire interior ($^{\circ}\text{C}$)	16.3	29.5	22.5	17.3	33.1	26.3
Temperatura de la cubierta ($^{\circ}\text{C}$)	13.0	32.7	22.4	14.7	40.2	29.0
Humedad relativa exterior (%)	33.3	87.7	63.4	14.1	79.0	39.8
Humedad relativa interior (%)	29.4	85.8	59.4	10.3	66.6	30.0

mitigar las altas temperaturas del aire interior resultado de la intensa radiación solar durante los meses de verano. De la ecuación de regresión entre las tasas de ventilación y velocidad de viento para el invernadero con cultivo, se deduce que esta tasa de ventilación es alcanzada sólo a velocidades de viento mayores de 5.4 m s^{-1} , que son poco frecuentes en esta región. Este resultado concuerda con el de Romero-Gomez *et al.* (2008), quienes reportan para un invernadero cenital de 3 naves ubicado en la misma zona que era necesario velocidades de viento mayores de 4.5 m s^{-1} para alcanzar las renovaciones de aire recomendadas. Esto significa que la ventilación natural es insuficiente para generar condiciones climáticas adecuadas para los cultivos y que se requiere de ventilación forzada.

El valor del coeficiente E_v se ha usado para caracterizar la eficiencia de la ventilación entre diferentes invernaderos (Teitel *et al.*, 2008). En el Cuadro 2 se presentan los valores del coeficiente global de efecto de viento E_v obtenidos en este estudio al ajustar los datos experimentales con el modelo de ventilación. Los valores de E_v obtenidos son del mismo orden de magnitud que los reportados por otros investigadores para invernaderos de dimensiones similares. Estos valores concuerdan con los valores reportados por Wang y Deltour (1996) para un invernadero tipo venlo de similares dimensiones, y por Fatnassi *et al.* (2002) y Kittas *et al.* (2002) para invernaderos con mallas en las ventanas. De acuerdo con los

the greenhouse with crop, it is deduced that this ventilation rate can be reached only at wind velocities of more than 5.4 m s^{-1} , which are infrequent in this

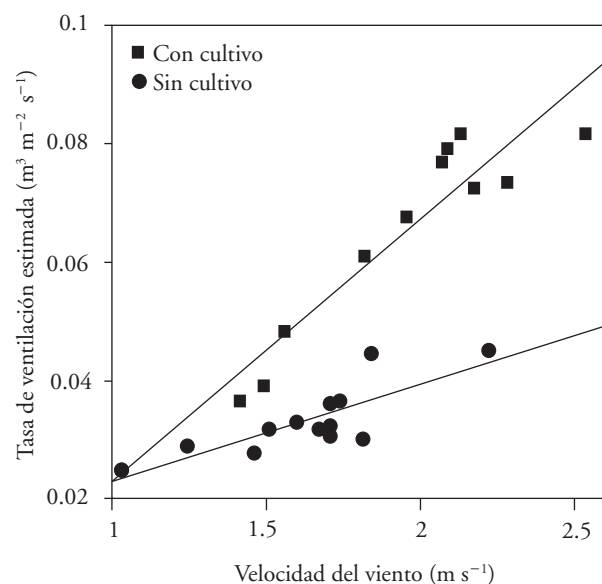


Figura 2. Comportamiento de las tasas de ventilación del invernadero estimadas con el método de balance de energía contra la velocidad del viento, para dos configuraciones del invernadero.

Figure 2. Behavior of the ventilation rates of the greenhouse estimated with the energy balance method against wind velocity, for two configurations of the greenhouse.

Cuadro 2. Resultados estadísticos de la calibración del modelo de tasas de ventilación.**Table 2. Statistical results of the calibration of the model of ventilation rates.**

Configuración	E_v	Ecuación de regresión	MAE	RMSE	R^2
Con cultivo	0.137	$G_{f,cal} = 0.81 G_{f,est} + 0.0062$	0.025	0.0030	0.74
Sin cultivo	0.220	$G_{f,cal} = 0.66 G_{f,est} + 0.0230$	0.0058	0.0046	0.86

índices estadísticos R^2 y raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el modelo de ventilación una vez calibrado predice de manera aceptable las tasas de ventilación natural. Además, de acuerdo al MAE el error global del modelo de ventilación fue menor para el caso del invernadero con cultivo. En general, de acuerdo con la ecuación de regresión el modelo calibrado sobreestima los valores a tasas bajas de ventilación y los subestima a tasas altas (Figura 3).

La porosidad de la malla anti-insecto instalada en las ventanas fue $\varphi=0.38 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y el coeficiente de descarga igual a $C_s=0.40$. Roy *et al.* (2002) mencionan que el coeficiente de descarga C_d varía entre 0.6 a 0.7 para la mayoría de las ventanas rectangulares sin mallas, con un valor promedio de 0.66, por lo cual se consideró un valor de $C_d=0.66$. Los valores de C_d y C_s al sustituirlos en la ecuación (13) se obtuvo un valor del coeficiente global de descarga de $C_{dT}=0.344$. Una vez conocido el valor de C_{dT} se determinó el coeficiente C_w a partir del coeficiente global de efecto de viento estimado con los datos experimentales (Cuadro 2), y el valor obtenido fue $C_w = 0.16$ con cultivo y de $C_w=0.41$ sin cultivo. Los valores de C_w son del mismo orden de magnitud que los reportados por otros investigadores para invernaderos con mallas en las aberturas de ventilación. En una revisión realizada por Molina-Aiz *et al.* (2009) sobre la eficiencia de ventilación natural de invernaderos equipados con mallas, los valores del coeficiente C_w variaron de 0.16 a 0.82. Roy *et al.* (2002) sugieren que los parámetros C_d y C_w dependen del tamaño y del diseño del invernadero, de su vecindad inmediata y en particular de la velocidad del viento.

Según Fatnassi *et al.* (2002), la razón de las tasas de ventilación de un invernadero con mallas y sin mallas, puede ser considerada proporcional a la razón de los coeficientes de descargas de sus ventanas, esto es:

region. This result coincides with that reported by Romero-Gomez *et al.* (2008), who found that for a zenithal greenhouse of 3 naves located in the same zone, wind velocities of more than 4.5 m s^{-1} were required to obtain the recommended air renovations. This means that natural ventilation is insufficient to generate climatic conditions adequate for the crops and that forced ventilation is required.

The value of the coefficient E_v has been used to characterize the efficiency of ventilation among different greenhouses (Teitel *et al.*, 2008). Table 2 presents the values of the global coefficient of the effect of wind E_v obtained in this study by adjusting

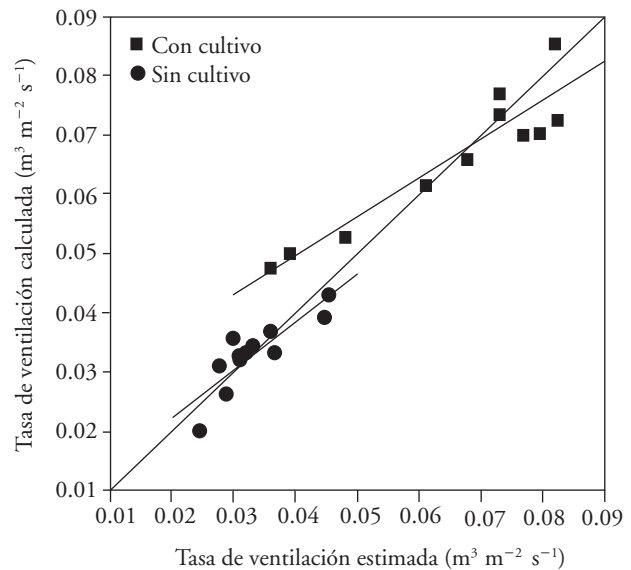


Figura 3. Ajuste de regresión entre las tasas de intercambio de aire estimadas con el método de balance de energía y los calculados con el modelo teórico, para dos configuraciones del invernadero.

Figure 3. Adjustment of regression among the air exchange rates estimated with the energy balance method and those calculated with the theoretical model, for two configurations of the greenhouse.

$$\frac{G_{\text{con malla}}}{G_{\text{sin malla}}} = \frac{C_{dT}}{C_d} = 0.52$$

Esto significa que, para una superficie de ventanas sin cambio, el flujo de ventilación con mallas representa una disminución de 48 % del flujo sin malla. Por tanto, un incremento en el área de ventilación de la misma proporción (48 %) es necesario para mantener la tasa de ventilación sin cambio.

Las tasas de ventilación estimadas en este estudio así como el modelo teórico de ventilación calibrado son aplicables en verano para una configuración de ventanas laterales y cenitales simultáneamente abiertas, con un cultivo de índice de área foliar de aproximadamente 3. Por ello se debe determinar el efecto sobre las tasas de ventilación de las configuraciones no incluidas en este estudio, como: solo ventilación cenital, solo ventilación lateral, la orientación del viento (Fatnassi *et al.*, 2009) y de las hileras del cultivo (Majdoubi *et al.*, 2007) con respecto al eje del invernadero, la altura e índice de área foliar del cultivo (Fatnassi *et al.*, 2009). Además, para que el modelo teórico de ventilación sea de aplicación más general es necesario incluir el área de ventilación cenital, el área de ventilación lateral, y el efecto chimenea (Kittas *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

Las tasas de ventilación natural estimadas mediante el método del balance de energía fueron más altas cuando las velocidades del viento fueron mayores y cuando el invernadero se encontraba sin cultivo. Las tasas de ventilación fueron bajas e insuficientes para lograr las renovaciones de aire recomendadas para tener condiciones climáticas adecuadas dentro de un invernadero. El método de balance de energía permitió una estimación precisa de la ventilación natural del invernadero. El modelo teórico de ventilación una vez calibrado permite un cálculo práctico de las tasas de ventilación natural del invernadero. Las mallas anti insecto instaladas en las aberturas de ventilación causaron una reducción del 48 % en las tasas de ventilación. Los resultados muestran que la ventilación natural del invernadero de baja tecnología es insuficiente para generar la temperatura y humedad óptimas que requieren los cultivos y, por lo tanto, es necesario usar sistemas de ventilación forzada.

the experimental data with the ventilation model. The values of E_v obtained are of the same order of magnitude as those reported by other investigators for greenhouses of similar dimensions. These values agree with those reported by Wang and Deltour (1996) for a venlo type greenhouse of similar dimensions, and by Fatnassi *et al.* (2002) and Kittas *et al.* (2002) for greenhouses with window screens. According to the statistical indices, R^2 and square root of the mean square error (RMSE), once the ventilation model is calibrated, acceptably predicts the natural ventilation rates. Furthermore, according to the MAE, the global error of the ventilation model was lower for the case of the greenhouse with crop. In general, according to the regression equation, the calibrated model overestimates the values at low ventilation rates and underestimates them at high rates (Figure 3).

The porosity of the insect screen installed in the windows was $\phi=0.38 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ and the coefficient of discharge equal to $C=0.40$. Roy *et al.* (2002) mention that the discharge coefficient C_d varies from 0.6 to 0.7 for most of the rectangular windows without screens, with an average value of 0.66; therefore, a value of $C_d=0.66$ was considered. The values of C_d and C_s when substituted in equation (13), allowed to obtain a value of the global coefficient of discharge of $C_{dT}=0.344$. Once the value of C_{dT} was known, it was determined the coefficient C_w from the global coefficient of the wind effect estimated with the experimental data (Table 2), and the value obtained was $C_w=0.16$ with crop and $C_w=0.41$ without a crop. The values of C_w are of the same order of magnitude as those reported by other investigators for greenhouses with screens in the vent openings. In a revision made by Molina-Aiz *et al.* (2009) of the efficiency of natural ventilation of greenhouses equipped with screens, the values of the coefficient C_w varied from 0.16 to 0.82. Roy *et al.* (2002) suggest that the parameters C_d and C_w depend on the size and design of the greenhouse, its immediate vicinity and particularly on wind velocity

According to Fatnassi *et al.* (2002), the reason for the ventilation rates of a greenhouse with screens and without screens can be considered proportional to the reason of the coefficients of discharge of its windows, that is:

$$\frac{G_{\text{whit screen}}}{G_{\text{whitout screen}}} = \frac{C_{dT}}{C_d} = 0.52$$

LITERATURA CITADA

- Álvarez, A. J., R. M. Oliva, and D. L. Valera. 2012. Software for the geometric characterisation of insect-proof screens. *Comput. Electron. Agric.* 82: 134-144.
- Boulard, T., and A. Bailie. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agric. For. Meteorol.* 65: 145-157.
- Boulard, T., J. F. Meneses, M. Mermier, and G. Papadakis. 1996. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. For. Meteorol.* 79: 61-77.
- Brundrett, E. 1993. Prediction of pressure drop for incompressible flow through screens. *J. Fluids Eng.* 115: 239-242.
- Demrati, H., T. Boulard, A. Bekkaoui, and L. Bouirden. 2001. Natural ventilation and microclimatic performance of a large-scale banana greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 80: 261-271.
- Espejel T., D., y I. L. López C. 2013. Determinación de las tasas de ventilación natural en un invernadero mediante modelos teóricos y gases trazadores. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4: 185-198.
- Fatnassi, H., T. Boulard, H. Demrati, L. Bouirden, and G. Sappe. 2002. Ventilation performance of a large Canarian-type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Biosyst. Eng.* 82: 97-105.
- Fatnassi, H.; C. Leynoras, T. Boulard, M. Bardin, and P. Nicot. 2009. Dependence of greenhouse tunnel ventilation on wind direction and crop height. *Biosyst. Eng.* 103: 338-343.
- Harmanto, H. J. Tantau, and V. M. Salokhe. 2006. Microclimate and air exchange rates in greenhouses covered with different nets in the humid tropics. *Biosyst. Eng.* 94: 239-253.
- Jones, P. H. 2008. Greenhouse environmental design considerations. In: Hochmuth, G. (ed). *Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook*, Volume 2, Document HS778. University of Florida, Gainesville, EE.UU. <http://ufdc.ufl.edu/IR00001684/00001> (Consulta: abril 2014).
- Katsoulas, N., T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier, and C. Kittas. 2006. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. *Biosyst. Eng.* 93: 427-436.
- Kittas, C., T. Boulard, and G. Papadakis. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Trans. ASAE* 40: 415-425.
- Kittas, C., T. Boulard, T. Bartzanas, N. Katsoulas, and M. Mermier. 2002. Influence of an insect screen of greenhouse ventilation. *Trans. ASAE* 45: 1083-1090.
- Majdoubi, H., T. Boulard, A. Hanafi, A. Bekkaoui, H. Fatnassi, H. Demrati, M. Nya, and L. Bouirden. 2007. Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. *Trans. ASABE* 50: 641-650.
- Mashonjowa, E., F. Ronsse, J. R. Milford, R. Lemeur, and J. G. Pieters. 2010. Measurement and simulation of the ventilation rates in a naturally ventilated Azrom-type greenhouse in Zimbabwe. *Appl. Eng. Agric.* 26: 475-488.
- Molina-Aiz, F. D., D. L. Valera, A. A. Peña, J. A. Gil, and A. López. 2009. A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. *Biosyst. Eng.* 104: 224-242.
- Romero-Gomez, P., I. L. Lopez-Cruz, and C. Y. Choi. 2008. Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of central Mexico. *Trans. ASABE* 51: 1753-1761.

This means that, for a window surface without change, the flow of ventilation with screens represents a reduction of 48 % of the flow without screens. Therefore, an increment in the area of ventilation of the same proportion (48 %) is needed to maintain the ventilation rate unchanged.

The ventilation rates estimated in this study as well as the theoretical calibrated ventilation model are applicable in summer for a configuration of lateral and zenithal windows simultaneously open, with a crop of leaf area index of approximately 3. Thus, the effect on the ventilation rates should be determined from the configurations not included in this study, such as: only zenithal ventilation, only lateral ventilation, orientation of the wind (Fatnassi *et al.*, 2009) and the crop rows (Majdoubi *et al.*, 2007) with respect to the greenhouse axis, the height and leaf area index of the crop (Fatnassi *et al.*, 2009). Furthermore, for the theoretical ventilation model to be of a more general application, it is necessary to include the zenithal ventilation area and the chimney effect (Kittas *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 2002).

CONCLUSIONS

The natural ventilation rates estimated by the energy balance method were higher when the wind velocities were higher and when the greenhouse was without a crop. The ventilation rates were low and insufficient for obtaining the air renewals recommended for having adequate climatic conditions within a greenhouse. The energy balance method allows a precise estimation of the natural ventilation of the greenhouse. Once it has been calibrated, the theoretical ventilation model allows a practical calculation of the natural ventilation rates of the greenhouse. The insect screens installed in the vent openings caused a reduction of 48 % in ventilation rates. Results show that the natural ventilation of the greenhouse of low technology is insufficient for generating the optimum temperature and humidity required by the crops, and therefore, it is necessary to use systems of forced ventilation.

—End of the English version—

—*—

- Roy, J. C., T. Boulard, C. Kittas, and S. Wang. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosyst. Eng.* 83: 1-20.
- Shilo, E., M. Teitel, Y. Mahrer, and T. Boulard. 2004. Air-flow patterns and heat fluxes in roof-ventilated multi-span greenhouses with insect-proof screens. *Agric. For. Meteorol.* 122: 3-20.
- Teitel, M., O. Liran, J. Tanny, and M. Barak. 2008. Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate. *Biosyst. Eng.* 101: 111-122.
- Valera, D. L., A. J. Álvarez, and F. D. Molina. 2006. Aerodynamic analysis of several insect screens used in greenhouses. *Span. J. Agric. Res.* 4: 273-279.
- Van 't Ooster, A., E. Heuvelink, V. M. Loaiza M., and E. J. Van Henten. 2008. Technical solutions to prevent heat stress induced crop growth reduction for three climatic regions in Mexico. *Acta Hortic.* 801: 1251-1258.
- Wang, S., and J. Deltour. 1996. An experimental ventilation function for large greenhouses base on a dynamic energy balance model. *Intl. Agric. Eng. J.* 5: 103-112.