

EVALUACIÓN DE UN MODELO FÍSICO DE SIMULACIÓN DEL CLIMA EN INVERNADERO CON VENTILACIÓN NATURAL

EVALUATION OF A PHYSICAL MODEL OF CLIMATE SIMULATION IN A GREENHOUSE WITH NATURAL VENTILATION

G. Arturo Del Bosque-Villarreal¹, Raúl Rodríguez-García^{1*}, Alejandro Zermeño-González¹, Diana Jasso-Cantú²

¹Departamento de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. (rrodriguez_uaan@hotmail.com)* ²Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila.

RESUMEN

Los invernaderos se usan cada vez más en México y en el 2009 había una superficie alrededor de 10 000 ha, de los cuales 60 % tienen cubierta de plástico. En gran parte de México prevalecen períodos largos con clima cálido, por lo cual el uso de la ventilación natural en los invernaderos es una alternativa para un control eficiente del clima al evitar los daños de los cultivos causados por calor. Los modelos de simulación se pueden usar como herramientas para el diseño y control de invernaderos. El objetivo de la presente investigación fue evaluar un modelo físico de simulación de la temperatura y humedad relativa en invernadero elaborado a partir del balance de energía simplificado, y la simulación se realizó con base al clima externo. La evaluación se efectuó en julio del 2009 y mayo del 2010 en un invernadero con ventilación natural de 4 ha con tomate (*Solanum lycopersicum* L.), ubicado en Galeana, Nuevo León, México. Las variables de entrada del modelo fueron temperatura y humedad relativa externas, radiación solar, velocidad y dirección del viento. El análisis de los resultados de la evaluación para 2009 y 2010 indica que el modelo simula aceptablemente el clima del invernadero, con un mejor ajuste para estimación de la temperatura ($r=0.98$ y 0.95 ; eficiencia de modelación= 0.92 y 0.83), que para humedad relativa ($r=0.96$ y 0.91 ; eficiencia de modelación= 0.82 y 0.71). El modelo fue menos acertado en la simulación de la temperatura en noche fría ($r=0.96$; eficiencia de modelación= 0.60), cuando el invernadero está cerrado.

Palabras clave: balance de energía, modelo físico, *Solanum lycopersicum* L.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2011. Aprobado: junio, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 46: 427-440. 2012.

ABSTRACT

Greenhouses are being increasingly used in México; in 2009 greenhouses covered an area of 10 000 ha, 60 % of them were made of plastic. In a large part of México long periods of hot weather prevail, so that the use of natural ventilation is an option for efficient climate control to avoid crop damage caused by heat. Simulation models can be used as tools in the design and control of greenhouses. The objective of this study was to evaluate a physical model for simulating temperature and relative humidity in a greenhouse. The model was constructed starting from a simplified balance of energy, and simulation was performed based on outside climate. The evaluation was carried out at Galeana, Nuevo León, México, in July 2009 and May 2010 in a greenhouse with natural ventilation, in which 4 ha of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) were grown. The input variables of the model were outside temperature and relative humidity, solar radiation, wind speed and direction. Analysis of the results of the 2009 and 2010 evaluations indicate that the model suitably simulates the greenhouse climate; a better fit was found for estimation of temperature ($r=0.98$ and 0.95 ; modeling efficiency = 0.92 and 0.83) than for relative humidity ($r=0.96$ and 0.91 ; modeling efficiency= 0.82 and 0.71). The model was less accurate in the simulation of cold night temperatures ($r=0.96$; modeling efficiency= 0.60) when the greenhouse is closed.

Key words: energy balance, physical model, *Solanum lycopersicum* L.

INTRODUCTION

In México, the area covered by greenhouses for crop production has increased considerably: in 2009 this area was around 10 000 ha, of which 60 % was plastic-covered, 34 % was shade house, and 4 % glass greenhouses (Macías-Duarte *et al.*,

INTRODUCCIÓN

En México la superficie de invernaderos para la producción agrícola ha aumentado considerablemente; en 2009 fue alrededor de 10 000 ha, de las cuales 60 % son de plástico, 34 % casa sombra y 4 % invernaderos de vidrio (Macías-Duarte *et al.*, 2010). En los países de la región Mediterránea caracterizada por períodos con clima cálido, adquirió gran importancia la ventilación natural para el enfriamiento del interior de los invernaderos, mostrando ventajas respecto a los sistemas tradicionales de ventilación forzada (Fatnassi *et al.*, 2004). En gran parte de México prevalecen períodos largos con clima cálido, por lo cual el uso de la ventilación natural es una alternativa para un control eficiente del clima.

El clima en los invernaderos resulta de una compleja interacción entre las condiciones climáticas externas, características y operación del invernadero, características y manejo del cultivo (Matallana y Montero, 1995). Las variables climáticas principales que interesa controlar son las que afectan más el desarrollo de las plantas: radiación solar, temperatura, humedad, y concentración de CO₂ (Roy *et al.*, 2002). El rendimiento máximo y calidad requieren que las variables climáticas se mantengan dentro de umbrales óptimos para el cultivo (López *et al.*, 2000).

La modelación del clima en invernaderos se desarrolló para describir el comportamiento climático del invernadero o para analizar los efectos de las técnicas de control ambiental (Leal, 2006). Modelos estáticos de balance de energía desarrollados por Bailey (1981), Seginer *et al.* (1988) y Boulard y Baille (1993) se construyen con base en leyes físicas articuladas con inferencias estadísticas de algunos parámetros relacionados con el cultivo (Schrevens *et al.*, 2008). Estos modelos fueron considerados menos precisos por su simplicidad y por involucrar pocos parámetros; sin embargo pueden ser útiles para evaluar las técnicas de control ambiental. Los modelos climáticos dinámicos se desarrollaron desde la década de 1970 (Takakura, 1989; Zhang *et al.*, 1997; Wang y Boulard, 2000) y se consideraron mejores en términos de precisión, pero requieren un gran número de parámetros. Hay diversos enfoques para elaborar los modelos dinámicos, como los modelos mecanicistas (Lopez *et al.*, 2007), redes neuronales (Ferreira *et al.*, 2002), algoritmos genéticos (Guzmán *et al.*, 2010), modelos neuro-difusos (López-Cruz y Hernández-

2010). In the Mediterranean region, characterized by periods of hot climate, natural ventilation became very important for cooling greenhouse interiors and was shown to have advantages over conventional forced ventilation systems (Fatnassi *et al.*, 2004). In a large part of México long periods of hot weather prevail, so that the use of natural ventilation is an alternative for efficient climate control.

The climate inside greenhouses is the result of a complex interaction between outside weather conditions and the characteristics and operation of the greenhouse, as well as characteristics and crop management (Matallana and Montero, 1995). The main climatic variables that require control are those that most affect plant growth: solar radiation, temperature, humidity and CO₂ concentration (Roy *et al.*, 2002). For maximum yield and quality it is necessary that the climatic variables are kept within the crop's optimal thresholds (López *et al.*, 2000).

Modeling greenhouse climate was first done to describe the behavior of greenhouse climate or to analyze the effects of the techniques of environmental control (Leal, 2006). Static energy balance models developed by Bailey (1981) Seginer *et al.* (1988) and Boulard and Baille (1993) were constructed on the basis of articulated physical laws with statistical inferences of some crop-related parameters (Schrevens *et al.*, 2008). These models were considered less precise because of their simplicity and because they involved few parameters. However, they can be useful to evaluate techniques of environmental control. Dynamic climatic models have been developed since the 1970s (Takakura, 1989; Zhang *et al.*, 1997, Wang and Boulard, 2000) and were considered better in terms of precision, but they require a large number of parameters. There are diverse approaches for constructing dynamic models, such as mechanistic models (López *et al.*, 2007), neuronal networks (Ferreira *et al.*, 2002), genetic algorithms (Guzmán *et al.*, 2010), neuro-diffuse models (López-Cruz and Hernández-Larragoiti, 2010), and optimization through the swarm theory (Hasni *et al.*, 2009). These models have been evaluated and have different degrees of fit in the simulation; they are recommended for operating control systems.

The static model of energy balance (Boulard and Baille, 1993) describes the dynamic behavior (time scale of one hour) of air temperature and relative humidity inside a greenhouse. These variables depend

Larragoiti, 2010) y optimización por la teoría de enjambre (Hasni *et al.*, 2009). Estos modelos se han evaluado, tienen diferentes grados de ajuste en la simulación y se recomiendan para operar sistemas de control.

El modelo estático de balance de energía (Boulard y Baille, 1993) describe el comportamiento dinámico (escala de tiempo de una hora) de la temperatura del aire y la humedad relativa en el interior de un invernadero. Estas variables dependen de la tasa de ventilación y mecanismos implicados en la transpiración y son representados por un modelo simple que consiste en dos ecuaciones lineales y dos incógnitas, y considera un limitado número de variables, incluidas las que describen la ventilación (Fatnassi *et al.*, 2004). El modelo adquirió importancia por el interés de evaluar la ventilación natural como un medio de enfriamiento de los invernaderos en clima cálido de la región Mediterránea y se usó para evaluar patrones naturales de ventilación en EE.UU. (Sase *et al.*, 2002), la tasa de renovación del viento en diferentes configuraciones de ventilas laterales y cenitales con y sin malla anti-insectos (Katsoulas *et al.*, 2006), la ventilación en la región cálida de Argentina (Bouzo *et al.*, 2006), así como para estimar la transpiración del cultivo al interior del invernadero basado en datos climáticos externos (Boulard y Wang, 2000; Fatnassi *et al.*, 2004).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad del modelo de Boulard y Baille (1993) para simular la temperatura y humedad relativa en un invernadero multicapilla, con una superficie de 4 ha, ventilación natural, y cultivo de tomate bola (*Solanum lycopersicum* L.), y así disponer de una herramienta para el diseño y control del clima de invernaderos con ventilación natural en regiones con clima cálido del norte de México. La evaluación del modelo se ha efectuado en invernaderos de tamaño menor (Boulard y Baille, 1995; Fatnassi *et al.*, 2004; Bouzo *et al.*, 2006) pero no en invernaderos con producción en escala comercial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo de predicción

La temperatura interna del invernadero se estima en el modelo con la Ecuación 1, modificada de Boulard y Baille (1993) para no considerar el efecto del enfriamiento debido a la nebulización de agua, en la que ΔT representa la diferencia entre la temperatura

on the rate of ventilation and on the mechanisms implicated in plant transpiration; they are represented by a simple model consisting of two linear equations and two unknowns. It takes into account a limited number of variables that include those that describe ventilation (Fatnassi *et al.*, 2004). The model acquired importance because of interest in evaluating natural ventilation as a means of cooling greenhouses in the hot climate of the Mediterranean region, and it was used to evaluate natural patterns of ventilation in the USA (Sase *et al.*, 2002), wind renovation rate in different configurations of lateral and zenithal vents with and without insect screens (Katsoulas *et al.*, 2006), and ventilation in the hot region of Argentina (Bouzo *et al.*, 2006), as well as to estimate crop transpiration inside the greenhouse based on outside weather data (Boulard and Wang, 2000; Fatnassi *et al.*, 2004).

The objective of this study was to evaluate the ability of the Boulard and Baille (1993) model to simulate temperature and relative humidity in a 4 ha multi-chapel greenhouse with natural ventilation and a globe tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.) to determine its possible use as a tool in the design and climate control in greenhouses with natural ventilation in the hot climate regions of northern México. Evaluation of the model has been done in smaller greenhouses (Boulard and Baille, 1995; Fatnassi *et al.*, 2004; Bouzo *et al.*, 2006) but not in greenhouses with commercial-scale production.

MATERIALS AND METHODS

Prediction model

Inside greenhouse temperature is estimated in the model with Equation 1, modified from Boulard and Baille (1993) so as not to consider the effect of cooling due to water vapor, where ΔT represents the difference between simulated inside temperature and measured outside temperature, while the vapor pressure deficit is estimated with Equation 2 in which Δe represents the difference between simulated inside vapor pressure and measured outside vapor pressure.

These equations include other functions and parameters that can be divided into:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{b + K_l}{K_l}\right) - bD_o - a\alpha\tau G_o}{b\delta(T_o) + \frac{(b + K_l)(K_s + K_c)}{K_l}} \quad (1)$$

interna simulada y la temperatura externa medida, mientras que el déficit de presión de vapor es estimado con la Ecuación 2 en la cual Δe representa la diferencia entre la presión de vapor interna simulada y la presión de vapor externa medida.

Estas ecuaciones comprenden otras funciones y parámetros que se pueden dividir en:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{b + K_l}{K_l}\right) - bD_o - a\alpha\tau G_o}{b\delta(T_o) + \frac{(b + K_l)(K_s + K_c)}{K_l}} \quad (1)$$

$$\Delta e = [\eta G_o - \Delta T(K_s + K_c)]K_1^{-1} \quad (2)$$

1. Datos del clima externo: G_o , radiación externa [Wm^{-2}]; D_o , déficit de presión de vapor externo [Pa]; T_o , temperatura externa [$^{\circ}C$]; V , velocidad del viento externo [ms^{-1}]; $\delta(T_o)$, pendiente de la curva del déficit de presión de vapor a valores de T_o [$Pa K^{-1}$].
2. Parámetros sobre características del invernadero y datos de operación: η , eficiencia térmica de la radiación solar [adimensional]; τ , coeficiente de transmisión de la energía solar de la cubierta [adimensional]; α , absorción de radiación por el cultivo [adimensional]. Los coeficientes de transferencia de calor de la superficie de la cubierta del invernadero (K_c), coeficiente de intercambio de calor latente (K_l), coeficiente de intercambio de calor sensible por ventilación (K_s) fueron calculados con las siguientes ecuaciones:

$$K_c = A + B \times VWm^{-2}K^{-1} \quad (3)$$

$$K_l = (\gamma\rho\lambda V_g N)/(3600S_g) Wm^{-2}Pa^{-1} \quad (4)$$

$$K_s = (\rho C_p V_g N)/(3600S_g) Wm^{-2}K^{-1} \quad (5)$$

donde V , velocidad del viento exterior [ms^{-1}]; A y B toman valores de 4 y 0.2 en invernaderos de doble capa (Boulard y Baille, 1993); N , tasa de renovación del viento dentro del invernadero [h^{-1}] y está determinada por la ecuación de Sbita *et al.* (1998):

$$N = (3600/h)(S_o/2)\zeta e^{0.5}V + N_o \quad (6)$$

donde S_o es área total de ventilas abiertas sobre la superficie del invernadero [adimensional]; el producto entre ζ coeficiente aerodinámico y $e^{0.5}$, coeficiente de viento [adimensional ambos] es reportado en varias investigaciones y refleja la relación entre la velocidad externa del viento y las renovaciones de aire del invernadero; este parámetro es

$$\Delta e = [\eta G_o - \Delta T(K_s + K_c)]K_1^{-1} \quad (2)$$

1. Outside weather data: G_o , outside radiation [$W m^{-2}$]; D_o , outside vapor pressure deficit [Pa]; T_o , outside temperature [$^{\circ}C$]; V , outside wind velocity [ms^{-1}]; $\Delta(T_o)$, slope of vapor pressure curve at values of T_o [$Pa K^{-1}$].
2. Parameters of greenhouse characteristics and operation data: η , thermal efficiency of solar radiation [dimensionless]; τ , transmission coefficient of solar energy [dimensionless]; α , crop radiation absorption [dimensionless]. The coefficients of heat transfer from the greenhouse roof (K_c), coefficient of latent heat exchange (K_l), coefficient of sensible heat flux exchange due to ventilation (K_s) were calculated with the following equations:

$$K_c = A + B \times VWm^{-2}K^{-1} \quad (3)$$

$$K_l = (\gamma\rho\lambda V_g N)/(3600S_g) Wm^{-2}Pa^{-1} \quad (4)$$

$$K_s = (\rho C_p V_g N)/(3600S_g) Wm^{-2}K^{-1} \quad (5)$$

where V , is the outside wind velocity [ms^{-1}]; A and B take on the values 4 and 0.2 in double-layered greenhouses (Boulard and Baille, 1993); N , rate of wind renewal inside the greenhouse [h^{-1}] that is determined by the equation of Sbita *et al.* (1998):

$$N = (3600/h)(S_o/2)\zeta e^{0.5}V + N_o \quad (6)$$

where S_o is the total open vent area over the surface of the greenhouse [both dimensionless]; the product of ζ , aerodynamic coefficient, and $e^{0.5}$, wind coefficient [dimensionless] is reported in several studies and reflects the relationship between outside wind speed and the renewal of air inside the greenhouse; this parameter is dependent on greenhouse design characteristics and in our study the values proposed by Sbita *et al.* (1998) were used for a greenhouse with characteristics similar to the greenhouse here evaluated; N_o is the wind renovation rate when wind speed is zero or the vents are totally closed (h^{-1}), and the value reported by Sbita *et al.* (1988) for a greenhouse of similar characteristics to the one here evaluated was used; S_g is the area of the greenhouse [m^2]; V_g is the volume of the greenhouse [m^3].

3. Crop parameters: a characterizes the influence of radiation on transpiration; b characterizes the influence of vapor pressure deficit on transpiration, and both are obtained with the equations proposed by Jolliet (1994):

$$a=0.154 \times \ln(1+1.1 \times IAF^{1.13}) \text{ [dimentionless]} \quad (7)$$

dependiente de las características de diseño del invernadero y en este estudio se usaron los valores propuestos por Sbita *et al.* (1998) para un invernadero con características similares a las del invernadero evaluado; N_0 es la tasa de renovación del viento cuando la velocidad del viento es cero o las ventilas están completamente cerradas [h^{-1}], y se usó el valor reportado por Sbita *et al.* (1998) para un invernadero con características similares a las del invernadero evaluado; S_g es superficie del invernadero [m^2]; V_g es volumen del invernadero [m^3].

3. Parámetros del cultivo: a , caracteriza la influencia de la radiación sobre la transpiración; b , caracteriza la influencia del déficit de vapor sobre la transpiración; y ambos se obtienen con las ecuaciones propuestas por Joliet (1994)

$$a=0.154 \times \ln(1+1.1 \times IAF^{1.13}) \text{ [adimensional]} \quad (7)$$

$$b=1.65 \times IAF(1-0.56 \times \exp(\eta g_0/18)) \gamma^{-1} [Wm^{-2}Pa^{-1}] \quad (8)$$

donde IAF es el índice de área foliar [adimensional].

4. Constantes físicas: γ es la constante psicométrica de la localidad; ρ es densidad del aire [1.29 kg m^{-3}]; λ es calor latente de vaporización del agua [$2500 \text{ kJ kg}^{-1}\text{k}^{-1}$]; C_p es capacidad térmica del aire a presión constante [$964.5 \text{ J kg}^{-1}\text{k}^{-1}$].

Implementación del modelo

Las ecuaciones del modelo se programaron en el ambiente de simulación STELLA® v 9.0.2 (<http://www.iseesystems.com/>)

Sitio de evaluación

La evaluación del modelo se realizó en un invernadero con producción comercial de tomate bola de Agroindustrias el Centenario S.P.R. de R.L., en San Rafael, Galeana, Nuevo León, en la carretera a la Hediondilla s/n; $25^\circ 14' 82'' \text{ N}$, $100^\circ 38' 40.48'' \text{ O}$; altitud 1880 m; y del 9 al 18 de julio del 2009 (primer período) y del 3 al 12 de mayo del 2010 (segundo período).

El área de invernaderos es un sistema modular de 16 ha con cuatro invernaderos multicapilla de 4 ha cada una, que convergen a un pasillo central cerrado y techado, dos de cada lado. Cada invernadero (Figura 1) tiene 22 capillas (9 m de ancho y 200 m de largo) y dos pasillos transversales. La evaluación se realizó en el invernadero 3 de este complejo donde la altura es 4 m hasta el inicio del arco y 5.5 m en la parte más alta. En cada capilla está instalada una ventila cenital con un área máxima de abertura de 300 m^2 (Figura 1). El invernadero tiene dos ventilas laterales con una abertura máxima de 600 m^2 (3 m x 200 m); una de las ventilas

$$b=1.65 \times IAF(1-0.56 \times \exp(\eta g_0/18)) \gamma^{-1} [Wm^{-2}Pa^{-1}] \quad (8)$$

where LAI is the leaf area index [dimensionless].

4. Physical constants: γ is the psychometric constant of the locality; ρ is air density [1.29 kg m^{-3}]; λ is latent heat of vaporization of water [$2500 \text{ kJ kg}^{-1}\text{k}^{-1}$]; C_p is the thermal capacity of air at constant pressure [$964.5 \text{ J kg}^{-1}\text{k}^{-1}$].

Model implementation

The equations of the model were programmed in the simulation environment STELLA® v9.0.2 (<http://www.iseesystems.com/>)

Site of evaluation

The model was evaluated in a greenhouse in which a crop of globe tomato is grown commercially, property of Agroindustrias del Centenario S.P.R. de R.L., located in San Rafael, Galeana, Nuevo León, highway to Hediondilla s/n; $25^\circ 14' 82'' \text{ N}$, $100^\circ 38' 40.48'' \text{ W}$; altitude 1880 m. The first period of evaluation was from July 9 to 18, 2009, and the second was May 12, 2010.

The 16 ha area of greenhouses is a modular system with four multi-chapel greenhouses, each covering 4 ha, converging to a closed and roofed central corridor, two greenhouses on each side. Each greenhouses (Figure 1) has 22 chapels (9 m x 200 m) and two transversal paths. The evaluation was done in greenhouses 3, which is 4 m to the beginning of the arch and 5.5 m at the highest point. In each chapel there is a zenithal vent with a maximum open area of 300 m^2 (Figure 1). The greenhouses has two lateral vents with a maximum opening of 600 m^2 (3 m x 200 m); one of the lateral vents converges at the roofed central path. The greenhouse has only natural ventilation and heating equipment for the winter and thus not used during this validation. The greenhouse is covered with double-layered plastic.

To obtain the data of the outside climate variables required by the model, a Davis Weatherlink (USA) meteorological station was installed at a distance of 100 m from the greenhouse. The meteorological equipment measured temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed and direction every 5 min during the evaluation periods (Figures 2 and 3). The sensors for radiation, temperature and relative humidity were places 2.5 m high and that for wind speed was 2 m high. Another identical station, but without wind sensor, was installed at the center of greenhouses 3 where all of the sensors were placed at a height of 3 m to facilitate crop management. The stations were calibrated before their installation.

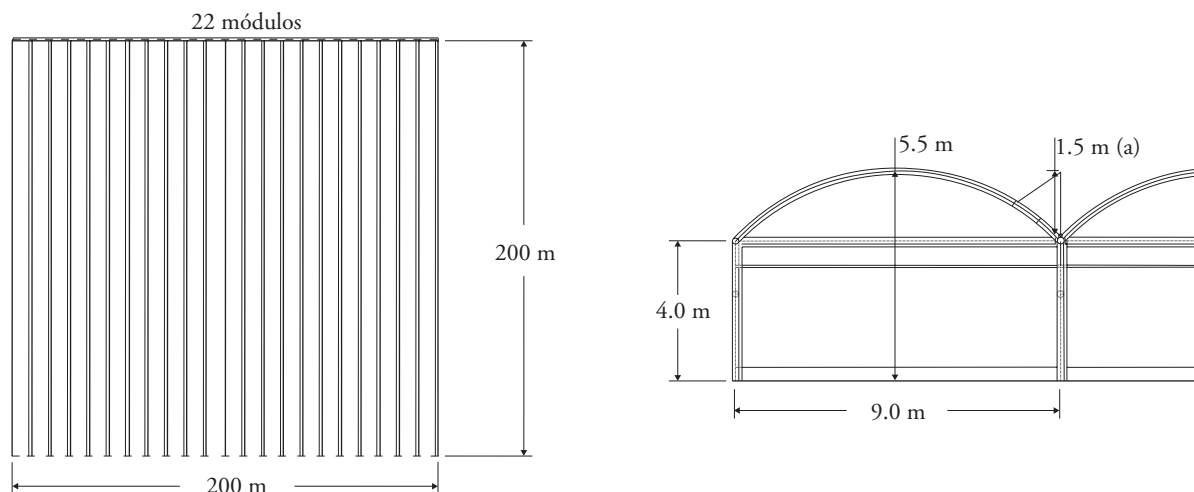


Figura 1. Diagrama de sección del invernadero localizado en San Rafael, Galeana, Nuevo León; (a) altura de la ventila cenital.
Figure 1. Diagram of a section of the greenhouse located in San Rafael, Galeana, Nuevo León; (a) height of the zenithal vent.

laterales converge al pasillo central techado. El invernadero tiene solamente ventilación natural y un equipo de calefacción para el invierno el cual no se usó durante la validación. El invernadero está cubierto con plástico de doble capa.

Para obtener los datos de las variables de clima externo requeridas por el modelo se instaló una estación meteorológica Davis Weatherlink® (USA) a 100 m del invernadero y cada 5 min midió temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad y dirección del viento durante los períodos de evaluación (Figuras 2 y 3). Los sensores de radiación, temperatura y humedad relativa se ubicaron a 2.5 m y el de velocidad del viento a 2 m de altura. Otra estación idéntica, sin sensor de viento, se instaló al centro del invernadero 3 con todos los sensores a 3 m de altura, para facilitar el manejo del cultivo. Las estaciones fueron calibradas antes de su instalación.

En el invernadero 3 había un cultivo de tomate bola con un índice de área foliar (*LAI*) de 3.5 a 3.65 en 2009 y de 2.5 a 2.6 en 2010; este *LAI* se evaluó con la metodología propuesta por Astegiano *et al.* (2001). El cultivo se regó tres veces por día con un sistema de riego por goteo. La densidad de plantas dentro del invernadero fue 1.2 plantas m^{-2} en ambos años.

La apertura de las ventilas se reportó como un valor porcentual de la apertura total (0 a 100 %). La ventila lateral que converge al pasillo central techado no fue considerada en el estudio por no presentar intercambio significativo de aire al estar aislada del efecto del viento. La apertura y cierre de ventilas fue manual, en función del clima externo y de la operación del invernadero. Regularmente, las ventilas cenitales permanecen a 25 % de apertura desde las 19:00 h hasta las 06:00 h del día siguiente cuando se abren a 50 %; entre las 8:30 y 9:30 h, dependiendo de la temperatura externa, se abren 100 %, cerrándose si hay amenaza de lluvia. Las ventilas laterales se cierran 100 % alrededor de las

In greenhouses 3 there was a crop of globe tomatoes with a leaf area index (*LAI*) of 3.5 to 3.65 in 2009 and 2.5 to 2.6 in 2010; this *LAI* was determined with the methodology proposed by Astegiano *et al.* (2001). The crop was irrigated three times a day with a drip irrigation system. Plant density inside the greenhouse was 1.2 plants m^{-2} in both years.

Vent opening was reported as a percentage of the total opening (0 to 100 %). The lateral vent that converges at the roofed central path was not considered in the study since there was no significant exchange of air because it was isolated from the effect of wind. The opening and closing of vents was done manually in function of outside weather and of greenhouse operation. As a rule, the zenithal vents are kept open 25 % from 19:00 h to 06:00 h of the following day when they are opened 50 %. Between 8:30 and 9:30, depending on outside temperature, they are opened 100 % and closed if there is a high probability of rain. The lateral vents are closed totally around 19:00 h, and between 08:30 h and 09:30 h they are opened 100 %. On days when pesticides are applied or when it rains, all of the vents are kept closed.

Statistical analysis

The results of the simulation of temperature and relative humidity (*RH*) were evaluated statistically. The correlation coefficient (*r*) between the measured variable (*x*) and the simulated variable (*y*) was calculated. Also, the standard error percentage of the prediction (%*ESP*) was calculated and it establishes the degree of dispersion between the observed variable and the predicted variable, the coefficient of efficiency of the model (*E*), the absolute mean error (*EMA*) and the absolute mean relative error (*ERMA*) (Wallach *et al.*, 2006). The statistical coefficients were obtained with the following equations:

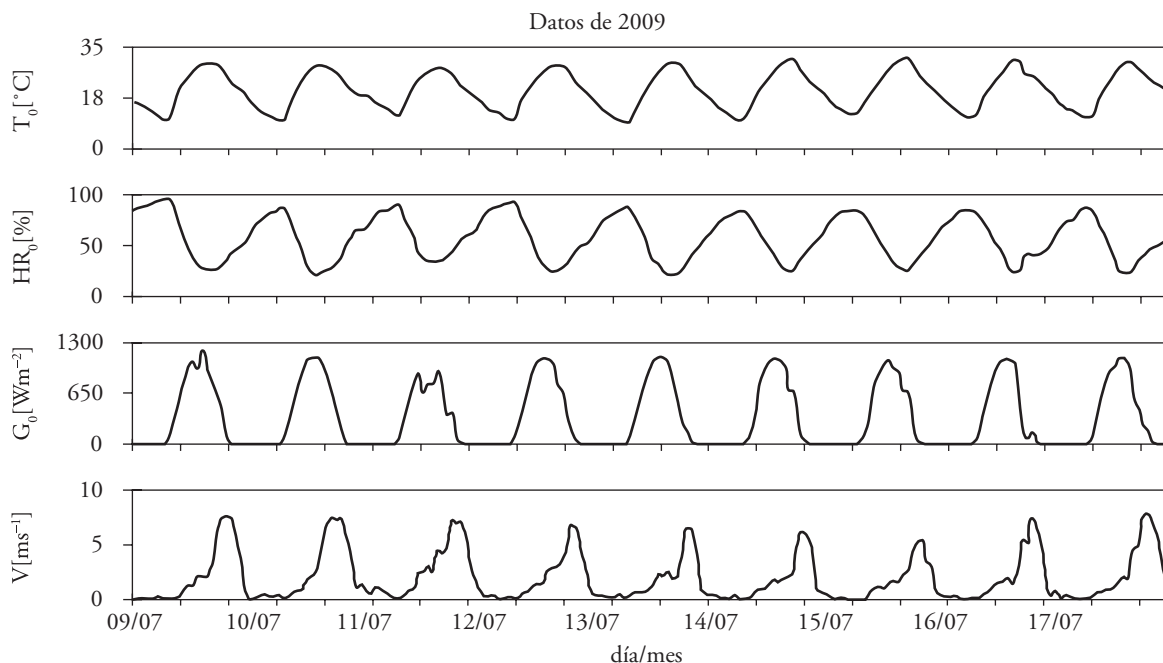


Figura 2. Variables meteorológicas en el exterior del invernadero, del 9 al 18 de julio del 2009.
Figure 2. Meteorological variables outside the greenhouse. July 9 to 18, 2009.

19:00 h y entre 0 8:30 y 09:30 h se abren 100 %. Los días cuando se aplican plaguicidas o se presentan lluvias, todas las ventilas permanecen cerradas.

$$\%ESP = \frac{100}{\bar{x}} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

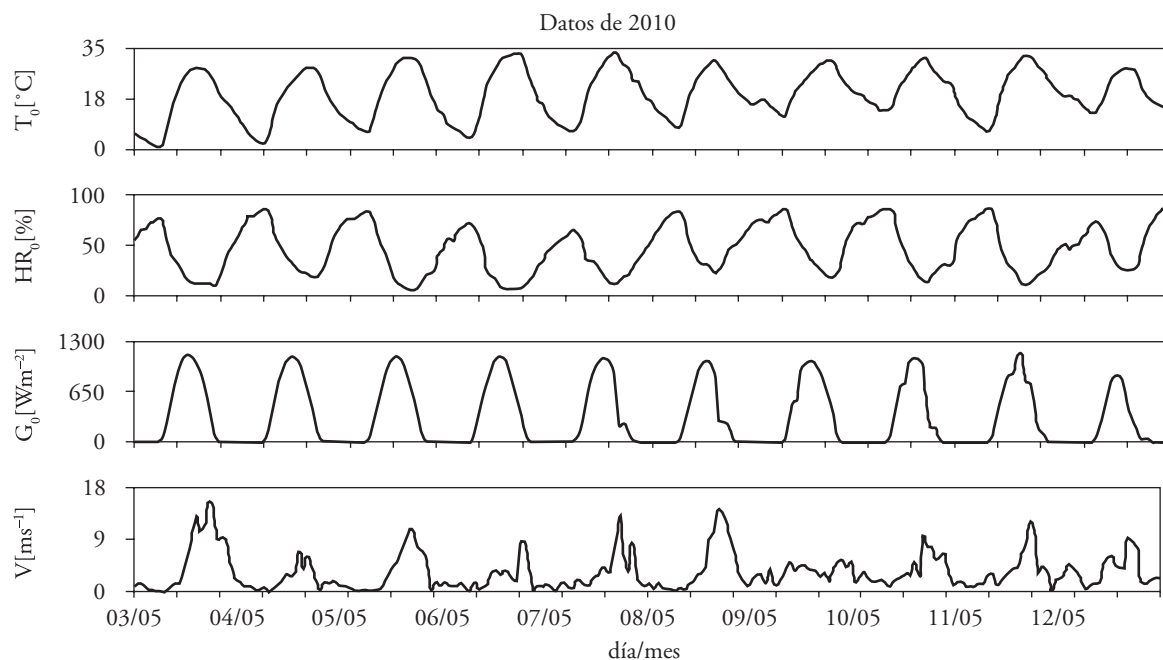


Figura 3. Variables meteorológicas en el exterior del invernadero, del 3 al 12 de mayo del 2010.
Figure 3. Meteorological variables outside the greenhouse. May 3 to 12, 2010.

Análisis estadístico

Los resultados de la simulación de la temperatura y humedad relativa (HR) se evaluaron estadísticamente, para lo cual se calculó el coeficiente de correlación (r) entre variable medida (x) y variable simulada (y). Además se calculó el error estándar porcentual de la predicción (%ESP) que establece el grado de dispersión entre la variable observada y la predictiva, el coeficiente de eficiencia de la modelación (E), el error medio absoluto (EMA) y el error relativo medio absoluto (ERMA) (Wallach *et al.*, 2006). Los coeficientes estadísticos se obtuvieron con las siguientes ecuaciones.

$$\%ESP = \frac{100}{\bar{x}} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (11)$$

$$ERMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|y_i|} \quad (12)$$

Para tener una relación perfecta, r y E deberían ser iguales a 1, y los coeficientes de error, %ESP, MAE y ERMA, iguales a 0 (Guzmán *et al.*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación estadística entre las variables medidas y estimadas para 2009 y 2010 se presenta en el Cuadro 1. El valor de r en los dos años para las dos variables climáticas es alto y cercano entre ellos, indicando buen ajuste entre variable medida y simulada. El valor de E indica una predicción alta del modelo para la temperatura del aire en 2009 ($E=0.92$), menor para la temperatura del aire en 2010 ($E=0.82$) y HR en los dos años ($E=0.82$ y 0.71) y más baja para la temperatura del aire en la noche ($E=0.60$). Los valores absolutos de %ESP, EMA y ERMA absoluto son menores para la temperatura del aire en 2009 y mayores para HR y temperatura en la noche y confirman una mejor predicción del modelo para la temperatura de aire.

La evaluación estadística muestra que este modelo puede simular la temperatura y HR al igual que los

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (11)$$

$$ERMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|y_i|} \quad (12)$$

To have a perfect relationship, r and E must be equal to 1 and the coefficients of error, %ESP, MAE and ERMA equal to 0 (Guzmán *et al.*, 2010).

RESULTS AND DISCUSSION

The statistical evaluation between the measured and estimated variables for the year 2009 and 2010 is presented in Table 1. The r values in the two years for the climatic variables are high and close to each other, indicating good fit between measured and

Cuadro 1. Coeficientes de correlación (r), eficiencia (E), error estándar porcentual (%ESP), error medio absoluto (EMA), error relativo medio absoluto (ERMA) de la simulación de temperatura del aire y humedad relativa en el interior del invernadero multicapa con ventilación natural, con producción de tomate durante 2009 y 2010.

Table 1. Correlation coefficients (r), efficiency (E), percentage standard error (%ESP), absolute mean error (EMA), absolute mean relative error (ERMA) of air temperature and relative humidity simulation inside the multichapel greenhouse with natural ventilation and tomato production during 2009 and 2010.

Estadísticos	2009	2010	Día	Noche
	Temperatura			
r	0.98	0.950	0.95	0.96
E	0.92	0.830	0.89	0.60
%ESP	7.94	14.940	8.60	16.69
EMA	1.48	2.720	1.73	3.71
ERMA	0.09	0.317	0.09	0.45
Humedad relativa				
r	0.96	0.91		
E	0.82	0.71		
%ESP	11.69	19.87		
EMA	6.16	7.65		
ERMA	0.13	0.22		

modelos dinámicos como los algoritmos genéticos (Guzmán *et al.*, 2010) y el algoritmo de optimización por enjambre (Hasni *et al.*, 2009). Los resultados de la investigación coinciden con los obtenidos por Sbita *et al.* (1998) y Bouzo *et al.* (2006) quienes encontraron mejor ajuste para la temperatura que para la HR en condiciones y configuraciones de invernadero diferentes.

La evolución horaria de temperatura y HR medida y simulada al interior del invernadero en el 2009 y 2010 se presenta en las Figuras 4 y 5. Los datos del 2009 son más consistentes que los del 2010 porque en 2010 las temperaturas mínimas fueron menores. Los días 7 y 11 de mayo del 2010 el modelo subestima la HR durante el día y la temperatura durante la noche; en esos días las ventilas permanecieron cerradas 100 % durante la noche por la aplicación de plaguicidas. El comportamiento del modelo sugiere que la tasa de renovación del viento cuando todas las ventilas están cerradas, N_0 , es menor al valor utilizado en el modelo reportado por Sbita *et al.* (1998) para un invernadero similar.

Los gráficos de dispersión para la temperatura y HR simuladas y medidas en ambos años (Figura 6) muestra que la correlación es buena, coincidiendo con los reportes de Bouzo *et al.* (2006) respecto a un

simulated variables. The value of E indicates a high prediction ability of the model for air temperature in 2009 ($E=0.92$), lower for air temperature in 2010 ($E=0.82$), and HR in the two years ($E=0.82$ and 0.71) and lower still for night air temperature ($E=0.60$). The absolute values of %ESP, EMA and ERM are lower for air temperature in 2009 and higher for HR and night temperature and confirm that the model is better in predicting air temperature.

The statistical evaluation shows that this model has the ability to simulate temperature and HR like the dynamic models such as genetic algorithms (Guzmán *et al.*, 2010) and the optimization algorithm by swarm (Hasni *et al.*, 2000). The results of the study coincide with those obtained by Sbita *et al.* (1998) and Bauzo *et al.* (2006) who found better fit for temperature than for HR in different greenhouse conditions and configurations.

The hourly evolution of temperature and HR measured and simulated inside the greenhouse in 2009 and 2010 is presented in Figures 4 and 5. The 2009 data are more consistent than those of 2010 because in 2010 the minimum temperatures were lower. On May 7 and 11, 2010, the model underestimates HR during the day and temperature during the night; on those days the vents remained closed 100 % during the night

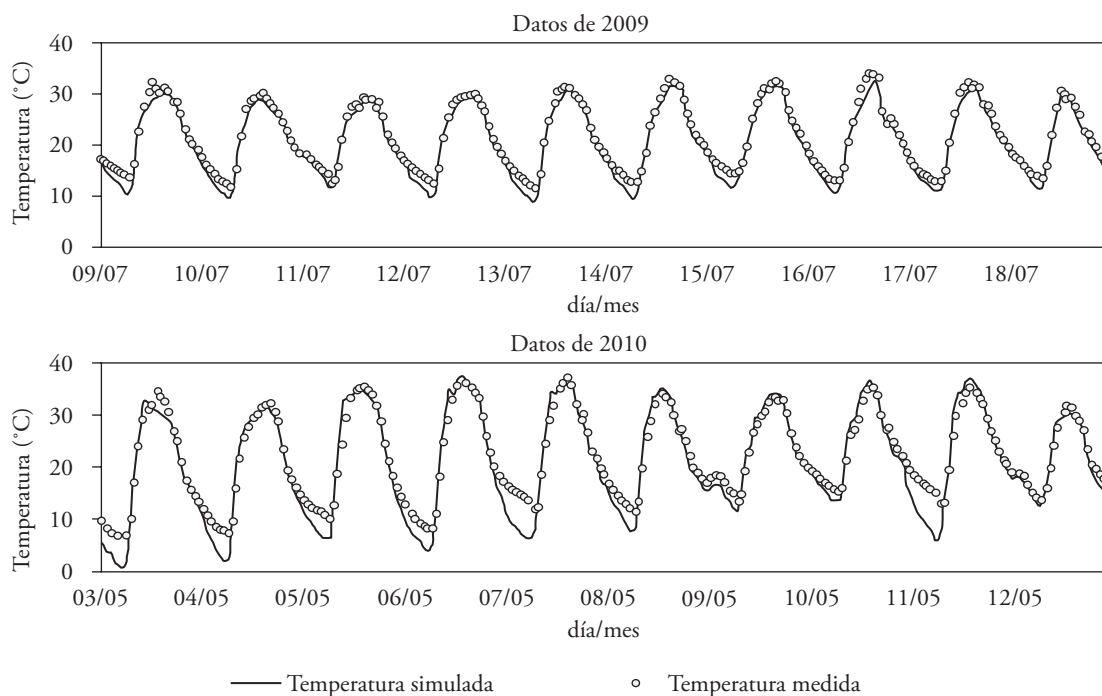


Figura 4. Evolución horaria de la temperatura medida y simulada en el 2009 y 2010.
Figure 4. Hourly evolution of measured and simulated temperatures in 2009 and 2010.

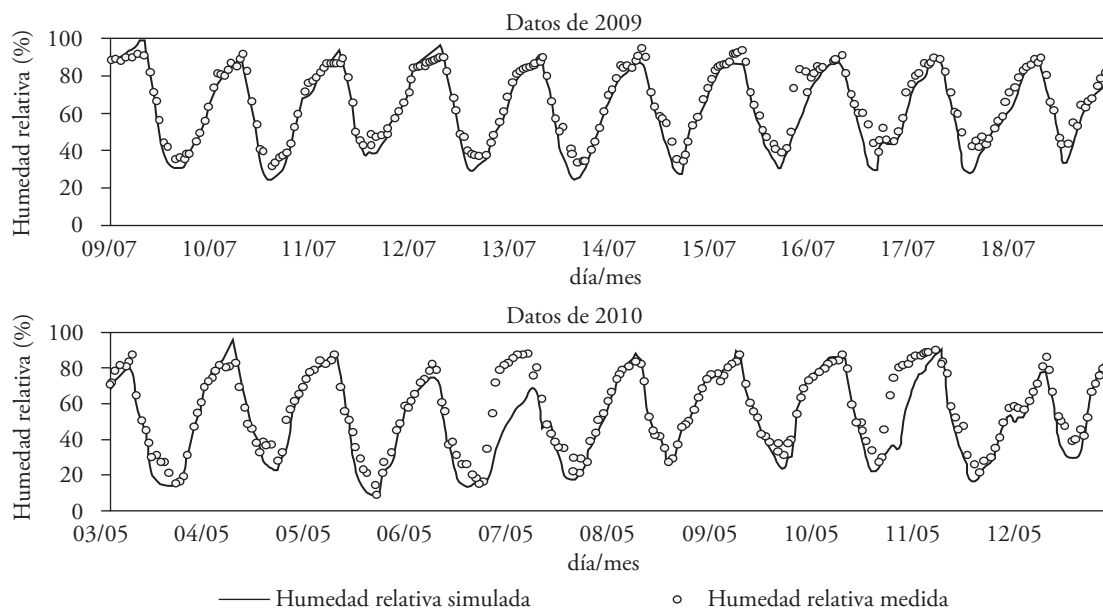


Figura 5. Evolución horaria de la humedad relativa medida y simulada en el 2009 y 2010.
Figure 5. Hourly evolution of measured and simulated relative humidity in 2009 and 2010.

invernadero de menor tamaño. En el 2009 la correlación es menor debido a un mayor número de valores subestimados asociados a temperaturas frías (menores a 10 °C). La correlación entre la HR simulada y medida

for pesticide application. The behavior of the model suggests that the rate of wind renewal when all the vents are closed, N_0 is lower than the value used in the model reported by Sbita *et al.* (1998) for a similar greenhouse.

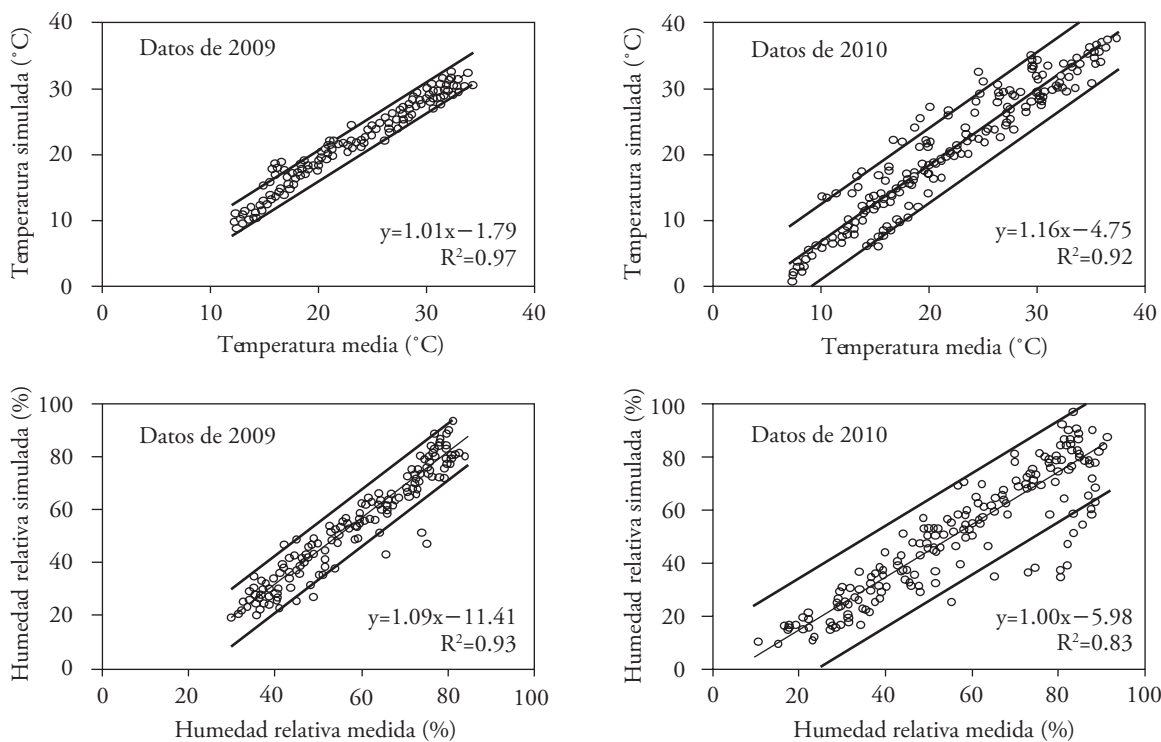


Figura 6. Temperatura simulada vs medida y humedad relativa simulada vs medida para el 2009 y 2010, con bandas de confianza al 95 %.
Figure 6. Simulated vs measured temperature and simulated vs measured relative humidity in 2009 and 2010, with confidence bands at 95 %.

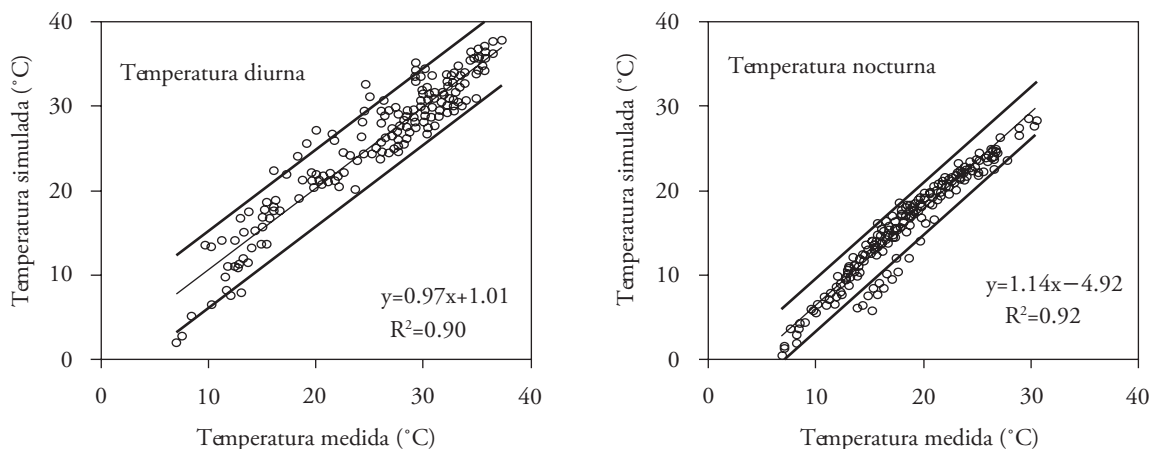


Figura 7. Temperatura simulada vs temperatura medida en el día (de 07:30 a 18:30 h) y en la noche (de 18:30 a 07:30 h) en el 2009 y 2010, con bandas de confianza al 95 %.

Figure 7. Simulated vs measured temperature during the day (07:30 h to 18:30 h) and during the night (18:30 h to 07:30 h), with confidence bands at 95 %.

es alta, aunque menor que la correspondiente a temperatura. A diferencia de la temperatura, la simulación de la HR no sugiere un patrón particular del error. La HR al interior del invernadero simulada se obtiene con una ecuación que considera Δe y ΔT , por lo que el error en la modelación de ambos parámetros se suma, provocando el menor ajuste (Castañeda *et al.*, 2007). Nuevamente hay consistencia con los resultados de Bouzo *et al.* (2006), quién también obtiene menor ajuste con HR que con temperatura.

La subestimación de la temperatura en las noches ocurre principalmente en horas frías (Figura 7). De hecho, esta subestimación también ocurre en las horas frías del día pero no en las horas cálidas de la noche, y se concentra entre 0 a 10 °C. Este fenómeno se explica porque en el desarrollo original del modelo Boulard y Baille (1993) realizaron tres simplificaciones principales:

1. Descartaron el efecto del flujo de calor en el suelo, por lo cual no se contempla en el modelo el almacenamiento de calor en el suelo que resulta de este flujo, que generalmente se invierte durante la noche y provoca aumento de la temperatura del ambiente.
2. Se descartó del modelo la condensación que se relaciona con alta HR y bajas temperaturas, y libera energía al ambiente. La alta HR en las noches resulta de las bajas tasas de renovación del viento por mantenerse las ventilas con una abertura menor a 25 %. Este fenómeno ocurrió

The dispersion graphs for simulated and measured temperature and HR in both years (Figure 6) shows that the correlation is good, coinciding with the reports of Bouzo *et al.* (2006) for a smaller greenhouse. In 2009 the correlation is lower due to a larger number of underestimated values associated with cold temperatures (below 10 °C). The correlation between simulated HR and measured HR is high, although lower than that for temperature. Unlike temperature, simulation of HR does not suggest any particular pattern of the error. Simulated HR inside the greenhouse is obtained with an equation that considers Δe and ΔT , and thus the errors in modeling of the two parameters are added together, causing poorer fit (Castañeda *et al.*, 2007). Again, the results are consistent with Bouzo *et al.* (2006), who also obtained poorer fit with HR than with temperature.

The underestimation of night temperature occurs mainly during cold hours (Figure 7). In fact, this underestimation also occurs in cold hours of the day but not in warm night hours, concentrating between 0 and 10 °C. This phenomenon occurs because in the original model development of Boulard and Baille (1993), they used three main simplifications:

1. They ruled out the effect of soil heat flux. Heat stored in the soil is not contemplated in the model, although heat resulting from this flow is generally inverted during the night causing an increase in air temperature.

durante las madrugadas, periodo en el cual es común la condensación y goteo dentro del invernadero.

3. En la determinación de la tasa de renovación del viento N se descartó el efecto chimenea que origina flujos de viento en función a las diferencias entre la temperatura interna y externa del aire y tiene especial relevancia cuando el área de ventilas abiertas es pequeña (Boulard y Wang, 2000), lo cual ocurre en el invernadero durante la noche.

Las tres simplificaciones anteriores implican fenómenos cuya relevancia aumenta en las noches. Boulard y Wang (2000) encontraron situaciones similares derivadas de estas simplificaciones en circunstancias de aire confinado, al utilizar el mismo modelo para estimar la evapotranspiración al interior de un invernadero con cultivo de tomate. Detectaron que el modelo presenta un aumento del error en días con alta HR y bajas temperaturas, al igual que en la presente investigación. La consideración de estos fenómenos en el modelo implica reducir su simplicidad y robustez, lo cual no garantiza un mejor desempeño (Boulard y Wang, 2000). Respecto al efecto chimenea, Boulard y Baille (1995) mostraron que modelos más complejos, algunos de los cuales contemplan este fenómeno, tienen un desempeño similar o inferior que el modelo evaluado en invernaderos con ventilación natural, pues las modificaciones necesarias para considerar el efecto chimenea implican otras fuentes de error.

En el sitio de evaluación, al igual que en varios invernaderos instalados en México, el principal problema de manejo en clima cálido son las altas temperaturas que pueden dañar las plantas. En la presente investigación bajo esta condición climática el modelo simula esta variable con buena precisión, a diferencia de los periodos frescos y fríos. La evaluación del modelo en invernaderos de características diversas y con climas igualmente dispares puede contribuir a especificar más su rango de validez.

CONCLUSIONES

El modelo evaluado predijo aceptablemente la temperatura y humedad relativa durante la mayor parte del día en un invernadero con ventilación natural. El modelo presentó una tendencia de subestimar la temperatura en las horas frías, especialmente

2. They also ruled out the condensation model, which is related to high HR and low air temperature when energy is released into the environment. High HR during the night results in low rates of air renewal since the vents are open less than 25 %. This phenomenon occurred during the early morning when it is common that vapor condenses and drips inside the greenhouse.
3. In the determination of the air renewal rate N , they eliminated the chimney effect that originates wind flows in function of the differences between inside and outside air temperatures. It has special relevance when the area of open vents is small (Boulard and Wang, 2000); this occurs in the greenhouse during the night.

These three simplifications implicate phenomena whose relevance increases during the night. Boulard and Wang (2000) found similar situations derived from these simplifications in situations of confined air when using the same model to estimate evapotranspiration inside a greenhouse with a tomato crop. They detected that the model has an increase in error on days with high HR and low temperatures, similar to the results found in our study. The consideration of these phenomena in the model implies reducing its simplicity and robustness, which does not guarantee better performance (Boulard and Wang, 2000). Regarding the chimney effect, Boulard and Baille (1995) showed that more complex models, some of which contemplate this phenomenon, have similar or poorer performance than the model evaluated in greenhouses with natural ventilation since the modifications required to apply the chimney effect implicate other sources of error.

In the evaluation site, as in several greenhouses installed in México, the main management problem in hot climates is high temperature, which may damage plants. In our study, under this climatic condition, the model simulates the variable quite precisely, unlike under conditions of cool and cold weather. The evaluation of the model in greenhouses with different characteristics and with equally uneven climate can contribute to further specifying its validity range.

CONCLUSIONS

The model evaluated in this study acceptably predicted temperature and relative humidity

en la noche-madrugada cuando el invernadero está cerrado. Esta subestimación se debe a las simplificaciones realizadas en el desarrollo del modelo que no considera la condensación que ocurre en la noche ni la aportación de calor por el suelo. El modelo debe ser evaluado y validado en regiones de clima cálido, en invernaderos con características y cultivo diferentes, que permita comprobar una alta capacidad de simulación, para utilizarlo en el diseño y control del clima de los invernaderos con ventilación natural en México, considerando que las altas temperaturas que predominan en gran parte de las zonas del país, pueden ser el principal problema de manejo del clima en los invernaderos.

LITERATURA CITADA

- Astegiano, E., J. Favaro, y C. Bouzo. 2001. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill.) utilizando medidas foliares lineares. Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales 16: 249-256.
- Bailey, B. J. 1981. The reduction of thermal radiation in glasshouse by thermal screens. J. Agr. Eng. Res. 26: 215-224.
- Boulard, T., and A. Baille. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. Agric. For. Meteorol. 65: 145-157
- Boulard, T., and A. Baille. 1995. Modeling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. J. Agric. Eng. Res. 61: 37-48
- Boulard, T., and S. Wang. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. Agric. For. Meteorol. 100: 25-34.
- Bouzo, C., N. Gariglio, R. Pilatti, D. Grenón, J. Favaro, F. Bouchet, and C. Freyre. 2006. 'Inversim': a simulation model for a greenhouse. Acta Hort. 719: 271-279.
- Castañeda, R., E. Ventura, R. Peniche, y G. Herrera. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. Agrociencia 41: 317-335.
- Fatnassi, H., T. Boulard, and J. Lagier. 2004. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. Biosystems Eng. 88 (4): 467-478.
- Ferreira, P. M., E. A. Faria, and A. E. Ruano. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. Neurocomputing 43: 51-75.
- Guzmán-Cruz, R., R. Castañeda-Miranda, J. J. García-Escalante, A. Lara-Herrera, I. Serroukh, y L. O. Solis-Sánchez. 2010. Algoritmos genéticos para la calibración del modelo climático de un invernadero. Revista Chapingo Serie Hort. 16 (1): 23-30.
- Hasni, H., B. Draoui, T. Boulard, R. Taïbi, and B. Dennai. 2009. A particle swarm optimization of natural ventilation parameters in a greenhouse with continuous roof vents. Sensors & Transducers J. 102 (39): 84-93.
- Jolliet, O. 1994. Hortitrans. A model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. J. Agric. Eng. Res. 57: 23-37.
- during most of the day in a greenhouse with natural ventilation. The model had a tendency to underestimate temperature during cold hours, especially during the night and early morning when the greenhouse is closed. This underestimation is due to simplifications made in the development of the model, which does not consider the condensation that occurs at night nor the contribution of heat from the soil. The model should be evaluated and validated in hot climate regions in greenhouses with different characteristics and crops. This would allow to ascertain a high simulation capacity to use it in the design and climate control of greenhouses with natural ventilation in México, considering that the high temperatures that predominate in large part of the country may be the main problem in managing greenhouse climate.

—End of the English version—

---*---

- Katsoulas, N., T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier, and C. Kittas. 2006. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. Biosystem Eng. 93 (4): 47-436.
- Leal, J. 2006. Efecto de la variación de la densidad del aire en la temperatura bajo condiciones de invernadero. Ciencia UANL 9 (3): 290-297.
- López, J., P. Lorenzo, E. Medrano, M. C. Sánchez-Guerrero, J. Pérez, H.M. Puerto, M. Arco, 2000. Calefacción de Invernaderos en el Sureste Español. 1a. d. Caja Rural de Almería. Junta de Andalucía. Almería, España. pp: 11-13.
- Lopez-Cruz, I. L., A. Rojano-Aguilar, W. Ojeda-Bustamante, y R. Salazar-Moreno. 2007. Modelos ARX para predecir la temperatura del aire de un invernadero: Una metodología. Agrociencia 41: 181-192.
- López-Cruz, I. L., y L. Hernández-Larragoiti. 2010. Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernadero tipo cenital y capilla en el centro de México. Agrociencia 44: 791-805.
- Macías-Duarte, R., R. L. Grijalva-Contreras, y F. Robles-Contreras. 2010. Efecto de tres volúmenes de agua en la productividad y calidad de tomate bola (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo condiciones de invernadero. Biotecnía 12 (2): 11-19.
- Matallana, A., y J. I. Montero. 1995. Invernaderos: Diseño, Construcción y Ambientación. 2a. ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 21-24.
- Roy, J. C., T. Boulard, C. Kittas, and S. Wang. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses. Biosystems Eng. 83: 1-20.
- Sase, S., E. Reiss, A. Both, and W. J. Roberts. 2002. Developing a natural ventilation model for open.roof greenhouses. Center for Controlled Environment Agriculture, Newsletter, Rutgers University 11: (3) 1-7.

- Sbita, L., T. Boulard, A. Baille and M. Annabi. 1998. A green climate model including the effects of ventilation and crop transpiration: validation for the South Tunisia conditions. *Acta Hort.* 458: 57-64.
- Schrevens, E., P. Jancsok, and K. Dieussaert. 2008. Uncertainty on estimated predictions of energy demand for dehumidification in a closed tomato greenhouse. *Acta Hort.* 801: 1347-1354
- Seginer, I., D. Kantz, U. M. Peiper, y N. Levav. 1988. Transfer coefficients of several polyethylene greenhouse covers. *J. Agr. Eng. Res.* 39, 19-37.
- Takakura, T. 1989. Technical models of the greenhouse environment. *Acta Hort.* 248: 49-54.
- Wallach, D., D. Makowski, and J. W. Jones. 2006. *Working with Dynamic Crop Models Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 447 p.
- Wang, S., and T. Boulard. 2000. Predicting the microclimate in a naturally-ventilated plastic-house under Mediterranean climate. *J. Agr. Eng. Res.* 75(1): 27-38.
- Zhang, Y., Y. Mahrer, y M. Margolin. 1997. Predicting the microclimate inside a greenhouse: an application of a one dimensional numerical model in an unheated greenhouse. *Agric. For. Meteorol.* 86: 291-297.