

EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA ESTIMAR LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA EN EL INTERIOR DE INVERNADERO CON VENTILACIÓN NATURAL

**Audberto Reyes-Rosas¹; Raúl Rodríguez-García^{1*}; Alejandro Zermeno-González¹; Diana Jasso-Cantú¹,
Martín Cadena-Zapata¹; Héctor Burgueño-Camacho².**

¹Posgrado en Ingeniería de Sistemas de Producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro Núm. 1923. Buenavista, Saltillo, Coahuila. C. P. 25315 MÉXICO. Correo-e: rrodriguez_uaan@hotmail.com (^{*}Autor para correspondencia).

²TPI, Todo Para Invernadero. Blvd. Jesús Kumate Rodríguez Núm. 3151 Sur Col. San Rafael, Culiacán, Sinaloa.

RESUMEN

Un modelo climático fue evaluado para estimar la evolución horaria de la temperatura del aire y la humedad relativa al interior de un invernadero con ventilación natural de tipo cenital, en función del clima externo. La evaluación se efectuó en el invierno 2008-2009 en un invernadero comercial con producción de tomate, localizado en Tlahualilo, Durango, México. El modelo incorporó los efectos de la ventilación natural para enfriar el invernadero. El resultado de la evaluación en dos días analizados en forma separada mostró un ajuste adecuado para la estimación de la temperatura del aire, y menor ajuste para humedad relativa. Es necesario mejorar la capacidad del modelo para simular el clima del invernadero con la finalidad de utilizarlo en un futuro como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la operación de invernaderos de este tipo.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: Balance de energía, balance de vapor de agua, radiación solar.

EVALUATION OF A MODEL FOR ESTIMATING THE TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY INSIDE GREENHOUSES WITH NATURAL VENTILATION

ABSTRACT

A weather model was evaluated to estimate the hourly time temperatura and relative humidity inside of a zenithal ventilated type greenhouse, as a function of the weather outside of the greenhouse. The study was carried out during the Winter of 2008-2009, in a comercial greenhouse with tomato production, located at Tlahualilo, Durango, Mexico. The model considered the effect of natural ventilation. The results of the evaluation for two non consecutive days showed a good estimation of the air temperature, and a reasonable good estimation of relative humidity. Some adjustments are still required to improve the quality of the model.

ADDITIONAL KEYWORDS: Energy balance, water vapor balance, solar radiation.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos para la utilización de invernaderos en la agricultura es obtener elevados rendimientos bajo una agricultura intensiva en clima controlado. Esto permite cultivar plantas en lugares y épocas del año donde las condiciones climáticas imposibilitan o limitan su desarrollo, además de obtener producciones de alto valor añadido (Díaz *et al.*, 2001).

En México desde mediados de los años 90, la horticultura en invernadero tuvo un ritmo acelerado de crecimiento. En el año 2009 se estimó una superficie de alrededor de 10,000 ha, de las cuales 60 % eran invernaderos de plástico, 34 % de casa sombra y 4 % invernaderos de vidrio (Macías-Duarte *et al.*, 2010). El factor determinante en este tipo de explotaciones es el control del clima dentro de los invernaderos (Castilla, 2005), bajo umbrales óptimos de temperatura y humedad relativa o umbrales máximos y mínimos que eviten daño a las plantas (López *et al.*, 2000).

Los invernaderos con ventilación natural pueden ser los que mejor se adapten a las condiciones climáticas que prevalecen en México, donde predominan largos periodos con clima cálido, porque el enfriamiento se puede efectuar con poco o sin requerimientos de energía (Sase *et al.*, 2002).

La modelación del clima en invernaderos se desarrolló con la finalidad de describir el comportamiento térmico del invernadero o para analizar los efectos de las técnicas de control ambiental (Leal, 2006). Modelos estáticos de balance de energía fueron desarrollados con tal fin por diferentes investigadores (Bailey, 1981; Seginer *et al.*, 1988; Boulard y Baille, 1993). Este tipo de modelos se construyen principalmente con base en leyes físicas que se articulan, por lo general, 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 dinámicos fueron considerados mejores en términos de precisión, pero requieren un gran número de parámetros. Una serie de modelos climáticos dinámicos fueron desarrollados desde la década de 1970 (Takakura, 1989; Zhang *et al.*, 1997; Wang y Boulard, 2000).

La prueba de diferentes modelos de invernaderos está dirigida a encontrar uno que permita la operación de gran cantidad de datos experimentales que describan el comportamiento de variables de entrada y salida del sistema que se utiliza para operar invernaderos por medio de sus sistemas de control. Diferentes enfoques para la elaboración de los modelos han sido implementados. Entre éstos se pueden citar modelos mecanicistas (López *et al.*, 2007), redes neuronales (Ferreira *et al.*, 2002), algoritmos genéticos (Guzmán *et al.*, 2010), modelos neuro-difusos (López-Cruz y Hernández-Larragoiti, 2010), y optimización por la teoría de enjambre (Hasni *et al.*, 2009). Estos modelos han sido evaluados presentando diferentes grados de ajuste en la simulación y son recomendados para operar sistemas de control.

INTRODUCTION

One of the main objectives for the use of greenhouses in agriculture, is obtaining a high performance during intensive agriculture in a controlled weather. This allows to cultivate plants in places and times of the year where the climatic conditions limit or make the development impossible, besides of getting a production with a high added value (Díaz *et al.*, 2001).

In Mexico, since the mid 90's, horticulture in greenhouses grew rapidly. In the year 2009 there was an estimate of around 10,000ha from which 60 % were plastic greenhouses, 34 % were shade-houses, and 4 % were glass greenhouses (Macías-Duarte *et al.*, 2010). The determining factor in this type of crop production is the weather control inside the greenhouses (Castilla, 2005), under optimal relative temperature and humidity thresholds, or maximum and minimum thresholds that avoid plants damage (López *et al.*, 2000).

Greenhouses with natural ventilation could be the ones that adapt better to the climatic conditions that prevail in Mexico, where long periods of time with warm weather are common, because the cooling can be done with little or no energy addition at all (Sase *et al.*, 2002).

Weather modeling in greenhouses was developed with the purpose of describing the thermal behavior of the greenhouse or to analyze the effects on the weather control techniques (Leal, 2006). Some static models for energy balance were developed by several investigators for such purpose (Bailey, 1981; Seginer *et al.*, 1988; Boulard and Baille, 1993). These types of models are built mainly based on physic laws that are articulated, in general, with statistical inferences of high parameters related with cultivations (Schrevens *et al.*, 2008). These models were considered less precise because of their simplicity and for involving just a few parameters; however, they can be useful to evaluate weather control techniques. For a better precision, the dynamic models were considered the best, but they required a high amount of parameters. A series of dynamic climatic models were developed since 1970 (Takakura, 1989; Zhang *et al.*, 1997; Wang and Boulard, 2000).

The different greenhouse models tests are directed towards finding one model that allows the operation of a bigger amount of experimental data that describes the variable behavior in and out of the system, which is used to operate greenhouses through their own control systems. Several approaches for models development have been implemented, such as: mechanical models, neural networks (Ferreira *et al.*, 2002), genetic algorithms (Guzmán *et al.*, 2010), neuro-fuzzy models (López-Cruz and Hernández-Larragoiti, 2010), and swarm theory optimization (Hasni *et al.*, 2009). These models have been evaluated by presenting different adjustment levels in the simulation, and they are recommended to operate control systems.

El modelo estático de balance de energía propuesto por Boulard y Baille (1993) con adecuaciones efectuadas por Sbita *et al.* (1998), Sbita *et al.* (1999) y Bouzo *et al.* (2006), 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 fue utilizado para evaluar patrones naturales de ventilación en Estados Unidos (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), y la ventilación en la región cálida de Argentina (Bouzo *et al.*, 2006). Los resultados estadísticos de las evaluaciones son comparativamente similares a las de algunos modelos dinámicos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la capacidad del modelo estático de Boulard y Baille (1993) para estimar la temperatura y humedad relativa dentro de un invernadero con ventilación natural, para considerarlo, una vez validado, como una herramienta de apoyo para el diseño y planeación del control del clima en invernaderos para regiones con clima cálido que predominan en el norte de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología consistió de cuatro etapas:

1) Establecimiento de las ecuaciones que conformaron el modelo y posteriormente su programación en el ambiente de simulación STELLA™ v9.0.2. 2) Registro de datos climáticos en el interior y exterior de un invernadero en producción. 3) Calibración del modelo. 4) Validación del modelo.

Balance de energía dentro del invernadero

La base para el modelo lineal de balance de energía del sistema invernadero en estado estacionario fue el siguiente:

$$\eta G_0 - K_s \Delta T - K_l \Delta e - K_c \Delta T - Q_m = 0 \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (1)$$

Donde los parámetros considerados son los siguientes: η , que representa el coeficiente de transmisión de la energía solar, el cual adquiere valores de 0.65 para cubierta simple y 0.60 para cubierta doble (Pilatti, 1997); la radiación solar global en el exterior, G_0 ($W \cdot m^{-2}$); la diferencia entre la temperatura interior y exterior del invernadero, ΔT (K); la diferencia de presión de vapor de agua entre el interior y el exterior, Δe (Pa), y el calor almacenado por el suelo del invernadero, Q_m ($W \cdot m^{-2}$).

El primer término de la ecuación 1 representa la ganancia de energía radiante. Los dos siguientes

The static model for energy balance proposed by Boulard and Baille (1993) with adaptations made by Sbita *et al.* (1998), Sbita *et al.* (1999), and Bouzo *et al.* (2006), describes the dynamic behavior of the air temperature and the relative humidity inside a greenhouse. These variables depend on the ventilation rate and mechanism implied in crop transpiration, which are represented by a simple model that consists of two lineal equations and two unknown factors, and these consider a limited number of variables including the ones that describe ventilation (Fatnassi *et al.*, 2004). This model gained importance because of the interest on evaluating natural ventilation as a way to cool off the inside of a greenhouse with warm weather, situated in the Mediterranean. This model was also used to evaluate natural ventilation patterns in the United States (Sase *et al.*, 2002), the air renovation rate in different configurations of the lateral and zenithal vents, with and without anti-insects net (Katsoulas *et al.*, 2006), and the ventilation in the warm zone of Argentina (Bouzo *et al.*, 2006). The statistical results of the evaluations are a lot similar to the ones presented in some dynamic models.

The objective of this study was to evaluate Boulard and Baille's (1993) static model ability to estimate temperature and relative humidity inside a natural ventilation greenhouse. And validate the model as a tool to support design and planning of weather control inside greenhouses for warm weather regions predominant in the north of Mexico.

MATERIALS AND METHODS

The methodology consisted in four stages:

1) Establishment of the equations that formed the model and later on, the programming in the simulation environment called STELLA™ v9.0.2. 2) Register climatic data from the inside and outside of a greenhouse in production. 3) Model calibration. 4) Model validation.

Energy balance inside the greenhouse

The base for the energy balance lineal model in the greenhouse system, in a stable condition is:

$$\eta G_0 - K_s \Delta T - K_l \Delta e - K_c \Delta T - Q_m = 0 \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (1)$$

In which the considered parameters are: η , which represents the transmission coefficient of the solar energy, which takes a 0.65 value for a simple cover, and a 0.60 value for a double cover (Pilatti, 1997), global solar radiation outside, G_0 ($W \cdot m^{-2}$); the difference between the inside and outside greenhouse temperature, ΔT (K); difference in water vapor pressure between the inside and outside of it, Δe (Pa), and the heat stored by the greenhouse ground, Q_m ($W \cdot m^{-2}$).

The first term in equation 1 represents the radiant energy gain, the next two incorporate the interchange of sensible and latent heat through ventilation (coefficients K_s

incorporan el intercambio de calor sensible y latente por ventilación (los coeficientes K_s y K_l son proporcionales a la tasa de intercambio de aire en el invernadero). El cuarto representa la transferencia de calor sensible de la superficie de la cubierta e incluye las pérdidas por convección y radiación. El quinto término que se podría incluir a la ecuación original de Boulard y Baille (1993) es Q_{calef} , el cual representa la energía calorífica proporcionada por el sistema de calefacción del invernadero, si es que cuenta con ello, lo cual fue así en este caso.

Los coeficientes de intercambio de calor sensible y latente por ventilación y de transferencia de calor sensible de la superficie de la cubierta fueron calculados por las siguientes ecuaciones:

$$K_s = \frac{\rho C_p V_g N}{3600 S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2)$$

$$K_l = \frac{F_c \rho \lambda V_g N}{3600 S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}) \quad (3)$$

$$K_c = A + B U \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4)$$

En donde ρ representa la densidad del aire ($1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_p es la capacidad térmica del aire ($964.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); V_g es el volumen del invernadero en (m^3); N representa el número de renovaciones de aire por hora (h^{-1}), y S_g es la superficie de suelo cubierto por el invernadero (m^2). F_c es el factor de conversión entre el contenido de vapor y la presión de vapor del agua del aire ($6.25 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w \cdot \text{Kg}_a \cdot \text{Pa}$) y λ es el calor latente de vaporización del agua ($2,500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). A es un coeficiente que adquiere valores de 6 para cubierta simple y 4 para cubierta doble y B toma valores de 0.5 en cubierta simple y 0.2 para cubierta doble. U representa la velocidad del viento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

El valor de N se calculó con la ecuación propuesta por Sbita *et al.* (1998) para ventilación natural:

$$N = \frac{3600}{h} \frac{s + s_0}{2} A_l \sqrt{C_w} U + N_0 \quad (\text{h}^{-1}) \quad (5)$$

En donde s representa la relación entre el área de las aperturas de las ventilas y el área de suelo cubierto por el invernadero ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$); s_0 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) representa el área fugas cuando el invernadero está cerrado con respecto al suelo cubierto por el invernadero; h se refiere a la altura promedio de las aberturas de las ventilas con respecto del suelo; A_l es el coeficiente aerodinámico, y C_w , el coeficiente de viento. N_0 representa la ocurrencia de ventilación (o fugas) cuando las ventilas están cerradas; $s = 0$, es un valor que se incorpora cuando la velocidad del viento es menor a $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Bouzo *et al.*, 2006). Los valores del parámetro N_0 son los que se muestran en el Cuadro 1.

and K_l are proportional to the air interchange rate inside the greenhouse). The fourth one represents the sensible heat transference from the cover surface and it includes the convection and radiation loss. The fifth term that could be included into the original equation by Boulard and Baille (1993) is Q_{calef} , which represents the heat energy provided by the heating system inside the greenhouse, if it has it, which in this study did happen.

The interchange coefficients of sensible and latent heat through ventilation, and the sensible heat transference on the cover surface were calculated through the next equations:

$$K_s = \frac{\rho C_p V_g N}{3600 S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2)$$

$$K_l = \frac{F_c \rho \lambda V_g N}{3600 S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}) \quad (3)$$

$$K_c = A + B U \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4)$$

Where ρ represents air density ($1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_p is the thermal capacity of the air ($964.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); V_g is the greenhouse volume in (m^3); N represents the amount of air renovations per hour (h^{-1}); and S_g is the ground covered by the greenhouse (m^2). F_c is the conversion factor between the vapor content and the air water vapor pressure ($6.25 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w \cdot \text{Kg}_a \cdot \text{Pa}$), and λ is the water vaporization latent heat ($2,500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). A is a coefficient that takes a value of 6 for the simple cover, and a value of 4 for the double cover; and B takes an 0.5 value for simple covers, and 0.2 for double covers. U represents the wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

The N value was calculated through the equation proposed by Sbita *et al.* (1998) for natural ventilation:

$$N = \frac{3600}{h} \frac{s + s_0}{2} A_l \sqrt{C_w} U + N_0 \quad (\text{h}^{-1}) \quad (5)$$

S represents the relationship between the open space through the vents and the ground area covered by the greenhouse ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$); s_0 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) represents the leaking area when the greenhouse is closed, including the ground which is covered by the greenhouse; h refers to the average height of the vents openings; A_l is the aerodynamic coefficient; and C_w is the air coefficient. N_0 represents the ventilation leaks, when they are closed; $s = 0$, is incorporated when the air speed is minor than $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Bouzo *et al.*, 2006). In Table 1 the N_0 parameter values are presented.

CUADRO 1. Valores de $A \cdot C_w^{0.5}$ y N_0 para condiciones de ventilas abiertas y cerradas (Sbita *et al.*, 1998).

Invernadero abierto	Invernadero cerrado
$A \cdot C_w^{0.5} = 0.157 \pm 0.026$	$C_w^{0.5} = 0.18 \pm 0.032$
$N_0 = 4.7 \pm 1.5$	$N_0 = 0.1 \pm 0.017$

El invernadero contó con cuatro calefactores ($N_{\text{calef}} = 4$) de combustión indirecta. El aire caliente se distribuye mediante mangueras de plástico flexible perforadas, colocadas sobre el suelo. El calor que éste aporta fue representado por Q_{calef} :

$$Q_{\text{calef}} = \frac{N_{\text{calef}} \times T_{\text{operación}} \times C_{\text{calorífica}}}{S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6)$$

Para su estimación se consideró el tiempo total que permaneció encendido el equipo en cada hora, $T_{\text{operación}}$ (h); la capacidad calorífica del equipo, $C_{\text{calorífica}}$ (J); el área de suelo cubierto por el invernadero, y se supuso que el calor se distribuyó de manera uniforme sobre dicha área.

La variable Q_m se calculó con la ecuación utilizada por Sbita *et al.* (1998).

$$Q_m = \eta F_s G_0 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (7)$$

Donde F_s representa la fracción de radiación absorbida por el suelo.

El balance de vapor de agua fue calculado con la siguiente ecuación (Bouzo *et al.*, 2006):

$$\alpha \eta G_0 + b \delta_{\text{Te}} \Delta T - (b + KI) \Delta e + b D_{(e)} + \lambda W = 0 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (8)$$

Donde α es el coeficiente de absorción de la radiación por el dosel de las plantas (0.95-0.97); $\delta_{(\text{Te})}$ es la pendiente de la curva de vapor a saturación a la temperatura externa del invernadero ($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$); $D_{(e)}$ es el déficit de presión de vapor al exterior del invernadero (Pa); η la transmitancia del material de cubierta, y λW es la energía disipada debido a la evaporación de la fracción de agua agregada a través de la nebulización ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Se hizo el cálculo de los parámetros a y b , donde a caracteriza la influencia de la radiación solar sobre la transpiración y b caracteriza la influencia del déficit de saturación sobre la transpiración en el cultivo del tomate. Esto se hizo mediante las siguientes ecuaciones, de acuerdo a Jolliet (1994):

$$a = 0.154 \ln(1 + 1.1 \text{ IAF}^{1.13}) \quad (\text{Adimensional}) \quad (9)$$

$$b = \frac{1.65 \text{ IAF} (1 - 0.56 e^{\left(-\frac{\eta G_0}{13}\right)})}{\gamma} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}) \quad (10)$$

TABLE 1. $A \cdot C_w^{0.5}$ and N_0 values with conditions on open and closed vents (Sbita *et al.*, 1998).

Opened greenhouse	Closed greenhouse
$A \cdot C_w^{0.5} = 0.157 \pm 0.026$	$C_w^{0.5} = 0.18 \pm 0.032$
$N_0 = 4.7 \pm 1.5$	$N_0 = 0.1 \pm 0.017$

There were four direct combustion heaters inside the greenhouse ($N_{\text{calef}} = 4$). The hot air is distributed through flexible perforated plastic hoses placed on the ground. The heat provided by it is represented with Q_{calef} :

$$Q_{\text{calef}} = \frac{N_{\text{calef}} \times T_{\text{operación}} \times C_{\text{calorífica}}}{S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6)$$

For its estimation, the total amount of time that it was kept on every hour was taken in consideration, $T_{\text{operation}}$ (h); the heat capacity of the equipment, $C_{\text{calorífica}}$ (J); the ground area covered by the greenhouse, it was assumed that the heat was distributed in an even way over such area.

The variable Q_m was calculated by the equation used by Sbita *et al.* (1998).

$$Q_m = \eta F_s G_0 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (7)$$

F_s represents the amount of radiation absorbed by the ground.

The water vapor balance was calculated through this equation (Bouzo *et al.*, 2006):

$$\alpha \eta G_0 + b \delta_{\text{Te}} \Delta T - (b + KI) \Delta e + b D_{(e)} + \lambda W = 0 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (8)$$

α represents the radiation absorption coefficient of the canopy plants (0.95-0.97); $\delta_{(\text{Te})}$ is the slope of the vapor curve saturating of the outside temperature ($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$); $D_{(e)}$ is the vapor pressure deficit outside the greenhouse (Pa); η is the covering material transmittance; and λW is the dissipated energy due to the evaporation of the amount of water added through fogging ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

A calculation of the parameters a and b was made, where a characterizes the influence of the solar radiation over transpiration, and b characterizes the saturation deficit influence over tomato transpiration. According to Jolliet (1994), this was made equations:

$$a = 0.154 \ln(1 + 1.1 \text{ IAF}^{1.13}) \quad (\text{Dimensionless}) \quad (9)$$

$$b = \frac{1.65 \text{ IAF} (1 - 0.56 e^{\left(-\frac{\eta G_0}{13}\right)})}{\gamma} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}) \quad (10)$$

Los dos parámetros anteriores dependen de *IAF* (índice de área foliar) del cultivo. Se estimó el área de las hojas de 20 plantas seleccionadas al azar con la ecuación propuesta por Astegiano *et al.* (2001):

$$AF = 0.34 L A - 9.31 \quad (\text{cm}^2) \quad (11)$$

Donde *AF* es el área foliar de la hoja, *L* es la longitud de la hoja (cm) y *A* es el mayor ancho de la hoja entre dos folíolos opuestos (cm). Posteriormente se calculó el *IAF* dividiendo el área foliar de las 20 plantas entre la superficie del suelo que ocupaban las plantas. A partir de las ecuaciones de balance de energía y de vapor de agua (1 y 8) se obtuvo un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, los cuales permitieron calcular los diferenciales de temperatura y presión de vapor entre el interior y exterior del invernadero (ΔT y Δe), tal como se muestra en las ecuaciones 12 y 13.

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{b+kl}{kl}\right)(\eta G_0 - Q_m) - bD_{(e)} - \alpha \times \eta G_0 - \lambda W}{b\delta_{Te} + \left(\frac{(b+kl)(k_c + k_s)}{kl}\right)} \quad (\text{K}) \quad (12)$$

$$\Delta e = \frac{\eta G_0 - Q_m + \Delta T(k_c + k_s)}{kl} \quad (\text{Pa}) \quad (13)$$

Posterior a la solución numérica del modelo, y con la finalidad de mejorar el ajuste entre lo estimado y los datos reales, se procedió a realizar adecuaciones al modelo anteriormente descrito y a ampliar su aplicación también a periodos nocturnos, característica que el modelo original no tenía.

Las modificaciones que se efectuaron al modelo anterior fueron las siguientes:

Incluir una relación empírica para estimar el flujo de calor del suelo hacia el interior del invernadero, ya que es la principal fuente de aportación de calor al invernadero durante la noche (Hölscher, 1989). Dicho parámetro se agrega a la ecuación 1 como una entrada de energía:

$$Q_{\text{suelo}} = \frac{G_{0 \max}}{F_r} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (14)$$

En donde $G_{0 \max}$ es la radiación máxima promedio horaria registrada para un día específico y F_r es un factor que se determinó de manera experimental (Jabulani y Zermelo, 2003) y que representa la relación del flujo de calor durante el día con respecto al que ocurre durante la noche. Para este caso el resultado de esa relación fue de $F_r = 33$.

Se hizo una modificación en el cálculo de *N* variando el valor de N_0 de acuerdo al nivel de apertura de las ventilas. Cuando las ventilas están abiertas al 100 % se consideran los mismos valores de N_0 del Cuadro 1 y el valor disminuye en la misma proporción en que se cierran dichas ventilas.

The parameters previously mentioned depend on the Leaf Area Index (*IAF*, by its acronym in Spanish) of the cultivate. An estimation of the leaves area from 20 randomly picked plants was made though an equation proposed by Astegiano *et al.* (2001):

$$AF = 0.34 L A - 9.31 \quad (\text{cm}^2) \quad (11)$$

AF is the leaf area, *L* is the leaf's longitude (cm), and *A* is the widest of a leaf between two opposite leaflets (cm). Later on, the *IAF* was calculated by dividing the leaf area of the 20 plants by the ground area that these plants covered. From the energy balance and water vapor equations (1 and 8), a two equations and two unknowns system was obtained, which let calculate the temperature and vapor pressure differential between the inside and outside of the greenhouse (ΔT and Δe). This was represented by equations 12 and 13.

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{b+kl}{kl}\right)(\eta G_0 - Q_m) - bD_{(e)} - \alpha \times \eta G_0 - \lambda W}{b\delta_{Te} + \left(\frac{(b+kl)(k_c + k_s)}{kl}\right)} \quad (\text{K}) \quad (12)$$

$$\Delta e = \frac{\eta G_0 - Q_m + \Delta T(k_c + k_s)}{kl} \quad (\text{Pa}) \quad (13)$$

After finding the model numerical solution and with the purpose of improving the adjustment between the estimation and the real data, modifications were made to the previously described model and its application was expanded too into nocturnal periods, this is a characteristic with which it does not count.

The alterations made to the previous model are:

To include an empirical relationship to estimate the heat flow from the ground towards the inside of the greenhouse, because it is the main source of heat towards the greenhouse during the night (Hölscher, 1989). This parameter is added to equation 1 as energy entry:

$$Q_{\text{suelo}} = \frac{G_{0 \max}}{F_r} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (14)$$

Where $G_{0 \max}$ is the maximum average radiation registered during a specific day, and F_r is a factor that was determined through an experimental way (Jabulani and Zermelo, 2003) and which represents the relation of the heat flow during the day according to the one that happens during the night. In this case, the relationship result was $F_r = 33$.

A modification in calculating *N* was made, changing the N_0 value according to the vents opening level. When the vents are open 100 %, the same N_0 values from Table 1 are taken in consideration, and the value decreases in the same proportion in which those vents are closed.

Se agregó un coeficiente de inercia térmica (F_{inercia}) al cálculo final de ΔT para amortiguar los incrementos acentuados de temperatura cuando las ventilas se encuentran cerradas en presencia de radiación solar (al amanecer y al atardecer), ya que el modelo no considera los elementos de almacenaje térmico, los cuales describen los efectos retardados de condiciones previas (Hölscher, 1989).

$$\Delta T_1 = F_{\text{inercia}} \Delta T \quad (\text{K}) \quad (15)$$

Otra propuesta de adaptación fue un factor de sombreado C_s que se agregó a la ecuación 7. Ésta representa la relación entre la sombra proyectada por las plantas sobre el área de suelo del invernadero:

$$Q_m = \eta F_s G_0 C_s \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (16)$$

Descripción del sitio experimental

El registro de los datos climáticos se efectuó en el interior y exterior de un invernadero en producción de tomate, ubicado en la propiedad El Lucero, en Tlahualilo, Durango, la cual se localiza a 103° 23" longitud oeste y 25° 52" latitud norte. Las características del invernadero son las siguientes: antigüedad de cinco años, 80 m de ancho por 120 m de largo, altura cenital de 6.27 m, tipo túnel modificado multicapilla (10 capillas), con policarbonato de doble capa en las paredes y polietileno de doble capa en el techo, dispone de ventilas cenitales (doble ventila) y laterales. Durante el desarrollo de la investigación sólo estuvieron operando las ventilas cenitales, de manera automatizada con base en umbrales de velocidad y dirección del viento y a humedad relativa. Los cambios en la apertura de las ventilas fueron registrados manualmente durante el transcurso del día. Estas ventilas contaban con tres niveles de apertura diferentes. Dichos datos se muestran en el Cuadro 2. Con ello se obtuvieron los valores de s para complementar la parametrización de la ecuación 2. Por ser periodo de invierno, las ventilas se abrían entre las 8 y 10 h, y se cerraban a las 16 h.

CUADRO 2. Valores de área de las apertura de las ventilas y de la relación de área de apertura de ventilas, área del suelo cubierto por el invernadero(s), para los tres niveles de abertura en el invernadero.

Nivel de la abertura	Área total de las aberturas (m ²)	S (m ² ·m ⁻²)
1	988	0.1029
2	1482	0.1543
3	2099.5	0.2186

A thermal inertia coefficient was added (F_{inercia}) to the ΔT final calculation in order to cushion the accentuated increase of temperature when the vents are closed because of the solar radiation (at sunrise and sunset). This happens because the model does not consider the thermal storage elements, which describe the delayed effects on previous conditions (Hölscher, 1989).

$$\Delta T_1 = F_{\text{inercia}} \Delta T \quad (\text{K}) \quad (15)$$

Another adaptation proposal was a shadowing factor C_s that was added to equation 7. This one represents the relationship between the shadows projected by the plants over the greenhouse ground:

$$Q_m = \eta F_s G_0 C_s \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (16)$$

Description of the experimental area

The register of the weather data was done inside and outside of a greenhouse producing tomato, placed in El Lucero, in Tlahualilo, Durango, which is located 103° 23" longitude west, and 25° 52" latitude north. The greenhouse characteristics are: five years old, 80 m wide by 120 m long, 6.27 m zenithal height. Tunnel-like, 10 chapels, with double polycarbonate coat on the walls and double polyethylene coat on the ceiling, it has zenithal (double vents) and lateral vents. During the research, only the zenithal vents were working in an automatic way and based on speed thresholds, wind direction, and relative humidity. Changes obtained when opening the vents, were manually registered during the whole day, these vents were used with three different opening levels; such data is presented in Table 2. Thanks to all that was mentioned above, the s values were obtained to complete the parametrization of equation number 2. The vents were opened between 8 and 10 h and they were closed at 16 because the study was made through a winter period.

TABLE 2. Vents opening area values and vents opening area relationship, ground covered by the greenhouse for the three opening levels inside the greenhouse.

Opening level	Total opening area (m ²)	S (m ² ·m ⁻²)
1	988	0.1029
2	1482	0.1543
3	2099.5	0.2186

El cultivo de tomate se encontraba en la etapa de quinto racimo. La distancia entre líneas fue de 2.02 m, y entre plantas, de 0.31 m en doble hilera, por lo que la densidad de población fue de 31,903 plantas·ha⁻¹. Las plantas se instalaron en canaletas. Se usó como sustrato lana de roca. La fertilización y riego se hicieron por medio de un sistema automatizado. El registro de los datos climáticos se realizó del 29 de diciembre de 2008 al 14 de enero de 2009. Para el registro de la radiación solar y la precipitación, se dispuso de dos estaciones Davis Vantage Pro2 (Davis Instruments, USA) una colocada en el interior a 2.30 m, y otra, al exterior del invernadero a 2 m de altura. También se dispuso de dos estaciones Eldar Shany MT-ST (Eldar Shany Technologies, Israel), instaladas al interior y exterior del invernadero. La externa estuvo colocada a 7 m y la interior a 2.30 m de altura. Se registró la dirección y velocidad del viento al exterior, y la temperatura del aire y la humedad relativa al interior y exterior. Con los datos de radiación solar se calculó el coeficiente de transmitancia (η) de la cubierta. Ambos tipos de estaciones registraron los datos a intervalos de 5 minutos. Con ello se estimó el promedio por hora para ser utilizados en el modelo.

Posterior a la realización de la simulación se realizó la evaluación estadística del modelo, 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), el cual establece el grado de dispersión entre la variable observada y la variable predictiva, el coeficiente de eficiencia (E), el error medio absoluto (EMA) y el error relativo medio absoluto (ERMA) (Wallach *et al.*, 2006). La medición de los coeficientes estadísticos se realizó con las ecuaciones siguientes:

$$\%ESP = \frac{100}{x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (17)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (19)$$

$$ERMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i|} \quad (20)$$

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

Los parámetros para la calibración del modelo se eligieron por inspección de papel (Castañeda *et al.*, 2007). Se seleccionaron aquellos que mediante un análisis de sensibilidad mostraron mayor afectación sobre el

The tomato cultivation was in its fifth truss stage and the distance between lines was 2.02 m. At the same time, the distance between plants was 0.31 m in double row, which means that the population density was 31,903 plants·ha⁻¹. Plants were placed in gutters and mineral wool was used as substratum; fertilization and irrigation was performed through an automatic system. From December 29 of 2008 to January 14 of 2009, the weather data register was made. Two Davis Vantage Pro2 (Davis Instruments, USA) stations were used to register solar radiation and rain, one was placed inside the greenhouse 2.30 m high, and the other one was placed outside 2 m high. Air temperature and humidity were also registered inside, through the use of an Eldar Shany MT-ST (Eldar Shany Technologies, Israel) station, placing it on 2.30 m high. Those factors previously mentioned plus air direction and speed, were all registered outside too, using another Eldar Shany MT-ST, which was placed 7 m away. With the solar radiation data, the cover transmittance (η) coefficient was calculated. Both types of stations registered the data with intervals of 5 minutes, which helped estimate the average amount to be used in the model.

After the simulation, the statistical evaluation of the model was performed. The correlation coefficient (r) between measured variable (x) and simulated variable (y), was calculated; plus, the prediction porcentual standard error was also calculated (% ESP) which established the diffusion amount between the observed variable and the predictive one, the efficiency coefficient (E), the mean absolute error (EMA, by its acronym in Spanish), and the relative mean absolute error (ERMA, by its acronym in Spanish) (Wallach *et al.*, 2006). The statistical coefficient measuring was made with the next equations:

$$\%ESP = \frac{100}{x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (17)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (19)$$

$$ERMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i|} \quad (20)$$

In order to have a perfect relationship, r and E should be equal to 1, and the % ESP, MAE, and ERMA values should be equal to zero (Guzmán *et al.*, 2010).

The parameters for the model calibration were chosen by a paper inspection (Castañeda *et al.*, 2007). Those that showed greater affectation over the model behavior through a sensitivity analysis, were selected. For the ΔT values, the

comportamiento del modelo. Así, para los valores de ΔT los cambios de los parámetros η y C_s debido al ángulo de incidencia de los rayos solares a lo largo del día fueron de los más influyentes y los valores de Δe fueron más sensibles a los valores del parámetro de AF. Lo anterior sugirió que estos parámetros debieron ser estimados con mayor precisión. Para realizar la calibración y validación se utilizaron datos de los días 10 y 13 de enero de 2009.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa la evolución horaria de la radiación solar en el interior y exterior del invernadero, y se aprecia como la radiación al interior fue aproximadamente la mitad de lo que se registró al exterior. Es por ello que el valor de η obtenido fue de 0.55, el cual es similar al propuesto por Pilatti (1997) para cubierta doble.

En el Cuadro 3 se muestran los datos estadísticos obtenidos de la simulación de las dos variables antes de realizar la calibración del modelo. Los coeficientes de correlación son altos, mayores para la temperatura del aire que para la humedad relativa y cercanos a 1. Los valores de los coeficientes de eficiencia, error estándar porcentual, error medio absoluto y error relativo medio absoluto indican que la simulación está lejos de los valores deseados.

La Figura 2 muestra los valores horarios medidos y estimados de la temperatura del aire y humedad relativa generados por el modelo de Boulard y Baille (1993). Para el día 10 de enero se observa que durante el periodo de las 0 a las 7 h el modelo subestima la temperatura del aire, en el resto del día los valores de temperatura estimada tienen un ajuste cercano a los valores medidos, excluyendo los periodos coincidentes con la apertura y cierre de las ventilas (8 y 17 h), donde el modelo predijo una temperatura significativamente superior a la medida. En el día 13 durante la mayor parte del día se observa subestimación de la temperatura con diferencias entre -1.5°C a -5°C , a excepción del periodo en donde se cierran las ventilas (16 h), con lo que se obtuvo una elevada sobrestimación de $+12.3^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura real.

changes in the η and C_s parameters based on the incidences angle of sun rays throughout the day, were part of the most influential, and the Δe values were more sensitive to the AF parameter values. These results suggested that those parameters should have been estimated more precisely. In order to perform the calibration and validation, data from days 10 to 13 in January of 2009 was used.

RESULTS AND DISCUSSION

In Figure 1 we can observe the hourly evolution of the solar radiation inside and outside of the greenhouse; it is appreciated how the radiation inside was approximately half of what it was registered outside. That is the reason why the η value obtained was 0.55, which is similar to the one proposed by Pilatti (1997) for a double cover.

In Table 3 the statistical data obtained through the two variables simulation before calibrating the model, is presented. The correlation coefficients are high and close to 1; they are higher for air temperature than for relative humidity. The values obtained for efficiency coefficients, the porcentual standard error, the mean absolute error, and the relative mean absolute error indicate that the simulation is far from presenting the desired values.

Figure 2 presents the measured and estimated hourly values about air temperature and relative humidity, generated by the Boulard and Baille (1993) model. By January 10, it is observed that during the 0 to 7 hour period the model underestimates the air temperature. During the rest of the days, the estimate temperature values are closely adjusted into the measured values, excluding the periods that coincided with the opening and closing of the windows (8 and 17 hours) where the model predicted a significantly higher temperature to the one presented in the measurement. On day 13, during most of the day, underestimation of temperature is observed with variations going from -1.5°C to -5°C , excepting the periods in which the vents are closed (16 hours); this helped obtain an overestimation of $+12.3^{\circ}\text{C}$ compared to the real temperature.

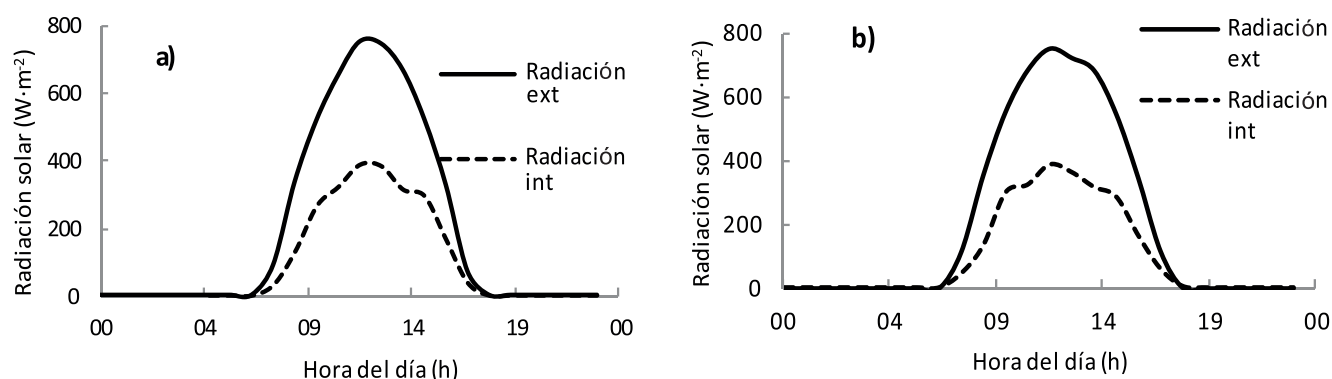


FIGURA 1. Radiación solar registrada al interior y al exterior del invernadero los días 8 (a) y 9 (b) de enero de 2009.

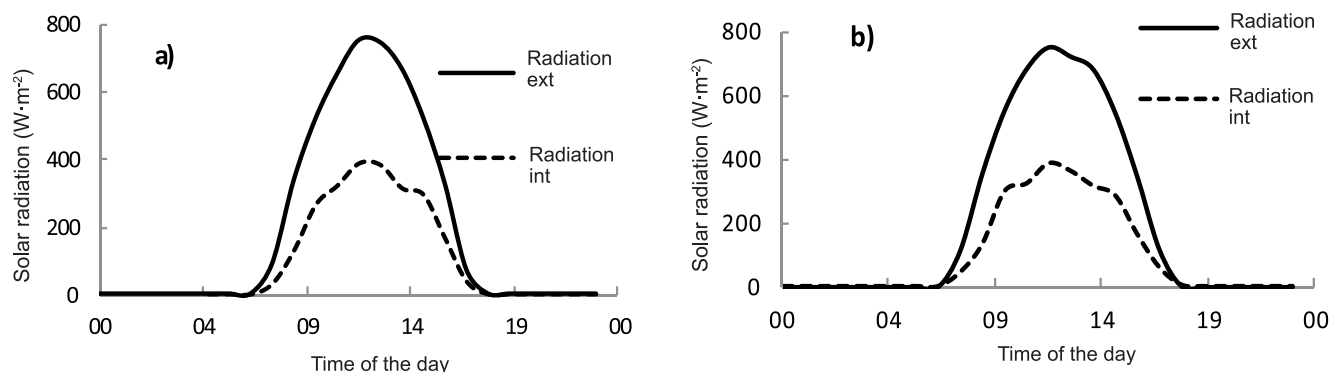


FIGURE 1. Solar radiation registered inside and outside the greenhouse on January 8 (a) and 9 (b) of 2009.

CUADRO 3. Coeficientes de correlación (r), eficiencia (E), error estándar porcentual (% ESP), error medio absoluto (EMA), error relativo medio absoluto (ERMA) de la simulación de la temperatura del aire (TA) y la humedad relativa (HR) en el interior del invernadero para los días 10 y 13 de enero de 2009. Valores estimados con el modelo base.

Estadístico	Día 10	Día 13
Temperatura		
Correlación (r)	0.9509	0.9088
Coeficiente E	0.7273	0.4943
Coeficiente % ESP	20.5922	37.5288
Coeficiente EMA	3.2741	4.6708
Coeficiente ERMA	0.2406	0.4322
Humedad relativa		
Correlación (r)	0.8308	0.8742
Coeficiente E	0.6983	0.49432
Coeficiente % ESP	14.2325	37.5288
Coeficiente EMA	5.0425	4.6708
Coeficiente ERMA	0.07681	0.4322

TABLE 3. Correlation coefficients (r), efficiency (E), porcentual standard error (% ESP), mean absolute error (EMA), relative mean absolute error (ERMA) about the air temperature simulation (TA) and the relative humidity (HR) inside the greenhouse during January 10 and January 13 of 2009. Estimated values with the basic model.

Statistical	Day 10	Day 13
Temperature		
Correlation (r)	0.9509	0.9088
Coefficient E	0.7273	0.4943
Coefficient % ESP	20.5922	37.5288
Coefficient EMA	3.2741	4.6708
Coefficient ERMA	0.2406	0.4322
Relative humidity		
Correlation (r)	0.8308	0.8742
Coefficient E	0.6983	0.49432
Coefficient % ESP	14.2325	37.5288
Coefficient EMA	5.0425	4.6708
Coefficient ERMA	0.07681	0.4322

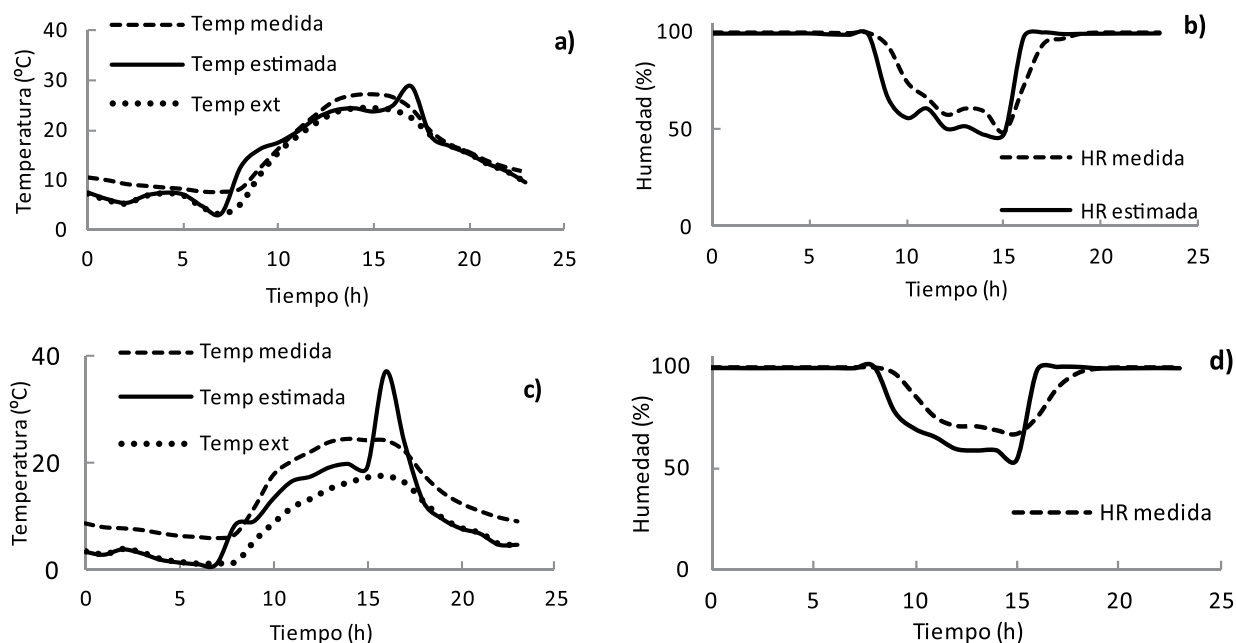


FIGURA 2. Valores horarios medidos y estimados de temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero y de temperatura exterior en los días 10 (a y b) y 13 (c y d) de enero de 2009 de acuerdo al modelo original.

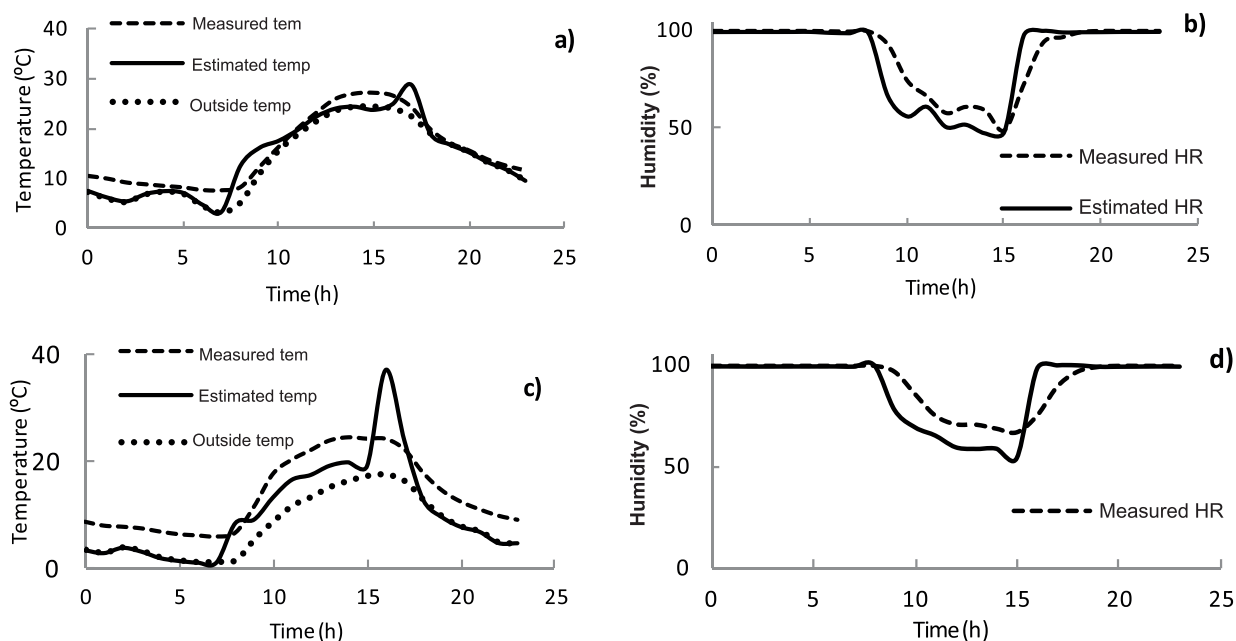


FIGURE 2. Measured and estimated hourly values of temperature and relative humidity inside and outside of the greenhouse, on January 10 (a and b) and January 13 (c and d) of 2009, according to the original model.

La subestimación del modelo durante el periodo nocturno se debe a que originalmente (Boulard y Baille, 1993) sólo consideraron a la radiación solar como única entrada de energía al sistema invernadero. Así, durante el periodo nocturno, el modelo estima una reducción progresiva de la temperatura del aire, por lo que tiende a igualarse a la temperatura del exterior durante el periodo de las 0 a las 6 h del día siguiente (Figura 2). Para corregir la subestimación de la temperatura durante la noche se efectuó una adecuación al modelo, agregando a la ecuación el calor que el suelo absorbe en el día y que libera por la noche (Q_{suelo}). Dicho término fue descrito en la ecuación 13.

El marcado incremento de temperatura observado por la mañana y en la tarde (8 y 17 h), cuando las ventilas están cerradas y hay presencia de radiación solar, es debido a que la renovación horaria de aire (N) es reducida a su mínimo valor, por lo que disminuyen los coeficientes de transferencia de calor sensible (K_s) y calor latente (K_l), que a su vez determinan un fuerte incremento de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero (ΔT). El modelo no considera la inercia térmica al interior del invernadero (Díaz *et al.*, 2001) que impide los cambios acentuados de temperatura del aire. Para corregir los incrementos en la temperatura, se propuso la modificación del cálculo y uso de N (renovaciones horarias) descrita anteriormente en la ecuación 5. Además se incluyó un factor de inercia térmica (F_{inercia}) que tiene la función de retardar la estimación del calentamiento y enfriamiento del sistema de manera inmediata en las primeras dos horas de radiación por la mañana, mientras las ventilas permanecen todavía cerradas, y en la primera y segunda hora a partir del cierre de ventilas por la tarde, cuando aún existe presencia de radiación. Dicho término es descrito en la ecuación 15. Se establecieron para este caso los valores de $F_{\text{inercia}} = 0.8$ y 0.6 para la primera y segunda hora, respectivamente.

Por lo que respecta a la humedad relativa del aire en el interior del invernadero, en los dos días el modelo subestimó los valores en la mayor parte del día y al atardecer los sobrestimó (entre las 16 y las 19 h). El modelo no consideró los aportes debido a la evaporación desde el sustrato. Esto podría explicar la subestimación de la humedad relativa (HR). También influyó el hecho de que el valor de la presión de vapor de agua entre el interior y el exterior (Δe) está en función de ΔT , lo cual provoca que los posibles errores relativos de este último afecten a Δe (Castañeda *et al.*, 2007). Por lo tanto, al mejorar el ajuste en la temperatura del aire se podría obtener un mejor ajuste en el valor de la HR.

En la Figura 3 se observan los valores de temperatura y humedad relativa simulados por el modelo modificado. La correspondiente comparación entre las dos simulaciones del modelo para su validación se realizó en los días, 10 y 13 de enero de 2009.

En la Figura 3 se observa que con las modificaciones efectuadas en el modelo eliminaron los incrementos

The model underestimation during the night period is because originally Boulard and Baille (1993) only considered solar radiation as the only energy source for the greenhouse system. So, during the night period the model estimates a progressive air temperature reduction and it tends to level off with the temperature outside during the period from 0 to 6 hours of the next day (Figure 2). To correct this situation a modification to the model was made by adding heat the ground absorbs during the day and releases during the night (Q_{suelo}). This term was described in equation 13.

The marked temperature increase observed in the morning and in the afternoon (8 and 17 hours), when the vents are closed and the solar radiation is present, is because the daily air renovation (N) is reduced to its minimum and the sensitive heat (K_s) and latent heat (K_l) transference coefficients decrease, which also determine a strong increase about the temperature difference between the greenhouse inside and outside (ΔT). The model does not take in consideration the thermal inertia inside the greenhouse (Díaz *et al.*, 2001) that prohibit the accentuated changes of air temperature. In order to correct these temperature raisings, a calculation modification and use of the parameter N (hourly renovations) were proposed. Besides, a thermal inertia factor was included (F_{inercia}) which works by delaying the system cooling and heating estimation in an immediate way during the first two morning radiation hours, while the vents are still closed; and during the first and second hours after closing the vents in the afternoon, when there are still radiation remains. This last term is described in equation 15. For this case, values $F_{\text{inercia}} = 0.8$ and 0.6 were established for the first and second hour, respectively.

Referring to the air relative humidity inside the greenhouse, in two days, the model underestimated the values from almost the whole day, and in the afternoon, they were overestimated (between 16 and 19 hours). The model did not consider the contributions because of the substratum evaporation. This could be an explanation for the relative humidity (HR) underestimation. Another influential factor was that the water vapor pressure value between the inside and outside of the greenhouse (Δe) is working according to ΔT , which makes that the possible relative errors of the last one mentioned affect Δe (Castañeda *et al.*, 2007). So, when improving the air temperature, a better adjustment in the HR value could be obtained.

In Figure 3 the relative humidity and temperature values simulated by the modified model are observed. The comparison between the two model simulations for their validity was made on January 10 and 13 of 2009.

In Figure3 it is observed that after the modifications applied on the model, the accentuated temperature increases were eliminated when the vents were opened or closed

acentuados de temperatura cuando las ventilas se abrían y cerraban en presencia de radiación solar. Además, las diferencias entre la temperatura estimada y medida son menores en el transcurso del día (-2°C en promedio). En cuanto a la HR, gráficamente no se observa una mejora relevante. La evaluación estadística del ajuste entre las variables medidas y estimadas se presenta en el Cuadro 4. Se observa que para la temperatura del aire, el coeficiente de correlación aumentó (de $r = 0.9509$ y 0.9088 , paso a $r = 0.9648$ y 0.9823 , respectivamente). Asimismo, el coeficiente de eficiencia (E) pasó de 0.7273 y 0.4943 a 0.8428 y 0.7955 , respectivamente. Los otros tres coeficientes disminuyeron el grado de error (de $\% \text{ESP} = 20.5922$ y 37.5288 pasó a $\% \text{ESP} = 15.4654$ y 23.1212 ; de $\text{EMA} = 3.2741$ y 4.6708 se redujo a $\text{EMA} = 2.1558$ y 2.9366). Los valores están más cercanos a los valores óptimos. En cuanto a la HR, hubo mejora en los coeficientes, aunque no fue significativa como en el caso de la temperatura.

La utilización de este modelo para simular la temperatura del aire tuvo resultados más cercanos en el ajuste entre valores medidos y estimados que otro tipo de modelos utilizados para simular esta variable, como son los algoritmos genéticos (Guzmán *et al.*, 2010) y un algoritmo de optimización por enjambre (Hasni *et al.*, 2009). Otros investigadores (Sbita *et al.*, 1998; Bouzo *et al.*, 2006) también encontraron mejor ajuste para la temperatura que para la humedad relativa en condiciones y configuraciones de invernadero diferentes. La subestimación de la temperatura que se observa durante el transcurso del día puede ser reducida reconsiderando los valores del coeficiente de transferencia de calor del material de cubierta (K_c), ya que, como lo señala Díaz *et al.* (2001), la extensa combinación de aditivos da a los materiales de cubierta propiedades muy particulares, y los hace capaces de modificar de manera significativa el entorno que protegen.

in the presence of solar radiation. In addition, the differences between the estimated and measured temperatures were lower as the day passes by (-2°C in average). No HR relevant improvement is observed in the graph. The statistical evaluation of the adjustment between the measured and estimated variables is presented on Table 4. It is observed that the correlation coefficient increased, referring to the air temperature (from $r = 0.9509$ and 0.9088 , it increased to $r = 0.9648$ and 0.9823 , respectively). Likewise, the efficiency coefficient (E) went from 0.7273 and 0.4943 into 0.8428 and 0.7955 , respectively. The three coefficients left decreased their error amount (from $\% \text{ESP} = 20.5922$ and 37.5288 , it transformed into $\% \text{ESP} = 15.4654$ and 23.1212 ; from $\text{EMA} = 3.2741$ and 4.6708 , it decreased into $\text{EMA} = 2.1558$ and 2.9366). These values are closer to the optimal values. There was an improvement in the HR coefficients, but it was not significant as with the temperature.

The use of this model to simulate the air temperature had closer results when adjusting measured and estimated values, than some other types of models used to simulate this variable, such as genetic algorithms (Guzmán *et al.*, 2010) and a swarm optimization algorithm (Hasni *et al.*, 2009). Some other researchers (Sbita *et al.*, 1998; Bouzo *et al.*, 2006) also found a better adjustment for temperature than for relative humidity in different greenhouse conditions and configurations. The temperature underestimation observed during the day could be reduced by adjusting king the heat transference coefficient values of the cover material (K_c) because, as Díaz *et al.* (2001) mentions, the extensive additives combination gives the cover materials very particular characteristics and makes them able to modify their environment in a meaningful way.

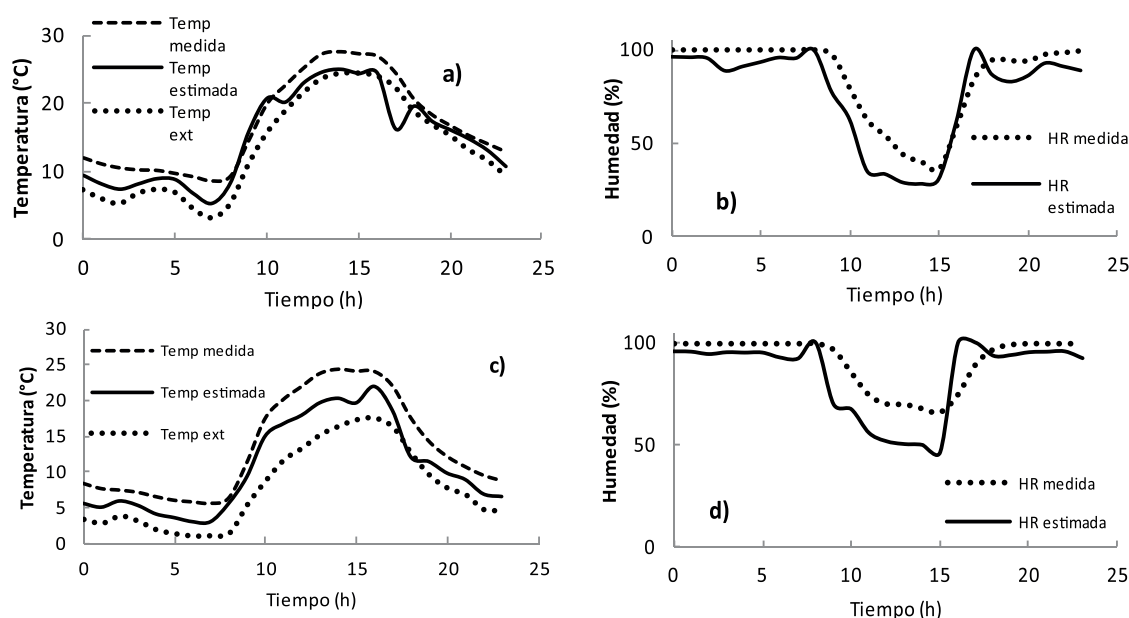


FIGURA 3. Valores horarios medidos y estimados de temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero y de temperatura exterior en los días 10 (a y b) y 13 (c y d) de enero de 2009 de acuerdo con el modelo modificado.

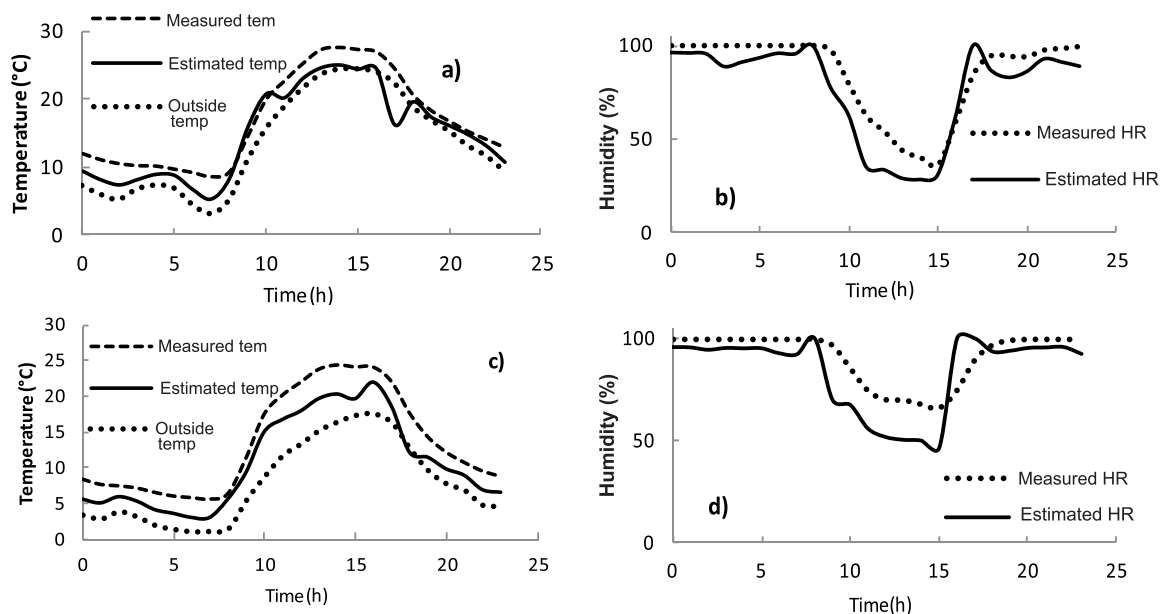


FIGURE 3. Measured and estimated hours about inside and outside temperature and relative humidity in the greenhouse, on January 10 (a and b) and January 13 (c and d) of 2009, according to the modified model.

CUADRO 4. 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 en los días 10 y 13 de enero de 2009. Valores estimados con el modelo modificado.

Estadístico	Día 10	Día 13
Temperatura		
Correlación (r)	0.9648	0.9823
Coeficiente E	0.8428	0.7955
Coeficiente % ESP	15.4654	23.1212
Coeficiente EMA	2.1558	2.9366
Coeficiente ERMA	0.1418	0.2358
Humedad relativa		
Correlación (r)	0.9514	0.8386
Coeficiente E	0.7294	-0.0983
Coeficiente % ESP	13.3101	14.2591
Coeficiente EMA	7.9751	10.4522
Coeficiente ERMA	0.1568	12.7467

TABLE 4. Correlation coefficients (r), efficiency (E), porcentual standard error (% ESP), mean absolute error (EMA), relative mean absolute error (ERMA) about the air temperature simulation (TA) and the relative humidity (HR) inside the greenhouse during January 10 and January 13 of 2009. Estimated values with the modified model.

Statistical	Day 10	Day 13
Temperature		
Correlation (r)	0.9648	0.9823
Coefficient E	0.8428	0.7955
Coefficient % ESP	15.4654	23.1212
Coefficient EMA	2.1558	2.9366
Coefficient ERMA	0.1418	0.2358
Relative humidity		
Correlation (r)	0.9514	0.8386
Coefficient E	0.7294	-0.0983
Coefficient % ESP	13.3101	14.2591
Coefficient EMA	7.9751	10.4522
Coefficient ERMA	0.1568	12.7467

Se sugiere investigar cambios en los parámetros que determinan el valor de N (renovaciones de aire), ya que esto influye en el cálculo de k_i y k_s , y éstos, a su vez, en el cálculo de la temperatura del aire, lo que podría permitir mejorar el ajuste del modelo de clima (Leal, 2006).

Este modelo puede ser utilizado en estudios futuros para estimar la transpiración del cultivo durante el día al interior del invernadero basado en datos climáticos externos como lo efectuaron Boulard y Wang (2000) y Fatnassi *et al.* (2004), con resultados bastante aceptables, así mismo corregir la subestimación de la HR.

CONCLUSIÓN

Se evaluó un modelo simple para estimar las condiciones de humedad relativa y temperatura en el interior de un invernadero en periodo invernal. El ajuste para temperatura del aire se mejoró con las adecuaciones hechas al modelo; no así en el caso de humedad relativa. Sin embargo, se requiere de un trabajo futuro para que el modelo pueda ser usado como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, para planear la instalación de invernaderos y para la estimación del comportamiento de su microclima al variar sus dimensiones y operación.

LITERATURA CITADA

- ASTEGIANO, E.; FAVARO, J.; BOUZO, C. 2001. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. Invest. Agr. Prod. Veg. 16(2): 249-256.
- BAILEY, B. J. 1981. The reduction of thermal radiation in glasshouses by thermal screens. J. Agr. Eng. Res. 26: 215-224.

It is suggested to investigate changes referring to the parameters that determine the N value (air renovations) because this influences the k_i and k_s calculation; and these also influence the air temperature calculation, which could let the improvement of the weather model adjustment (Leal, 2006).

This model can be used in future studies to estimate the cultivation transpiration during the day and inside a greenhouse, based on external weather data, as it was made by Boulard and Wang (2000), and Fatnassi *et al.*, (2004) with pretty acceptable results; likewise, it could be used to correct the HR underestimation.

CONCLUSION

A simple model was evaluated to estimate the relative humidity and temperature conditions within a greenhouse during winter season. The air temperature adjustment was improved thanks to some adequacies made to the model; it was not the same case on the relative humidity. However, additional research is required to use the model as a support tool in decision making when planning greenhouse constructions and for estimating its microweather behavior if size and operation are modified.

End of English Version

- BOULARD, T.; BAILLE, A. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agric. For. Meteorol.* 65: 145-157.
- BOULARD, T.; WANG, S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agric. For. Meteorol.* 100: 25-34.
- BOUZO, C.; GARIGLIO, N.; PILATTI, R.; GRENÓN, D.; FAVARO, J.; BOUCHET, E.; FREYRE, C. 2006. Inversim: a simulation model for greenhouse. *Acta Hort.* 719: 271-278.
- CASTILLA, N. 2005. *Invernaderos de plástico: Tecnología y manejo*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 459 p.
- CASTAÑEDA, R.; VENTURA, E.; PENICHE, R.; HERRERA, G. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41: 317-335.
- DÍAZ, T.; ESPÍ, E.; FONSECA, A.; JIMÉNEZ, J. C.; SAMERÓN, A. 2001. *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 315 p.
- FATNASSI, H.; BOULARD, T.; LAGIER, J. 2004. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. *Biosystem Engineering* 88(4): 467-478.
- FERREIRA, P. M.; FARIA, E. A.; RUANO, A. E. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing* 43: 51-75.
- GUZMÁN-CRUZ, R.; CASTAÑEDA-MIRANDA, R.; GARCÍA-ESCALANTE, J. J.; LARA-HERRERA, A.; SERROUKH, I.; SOLÍS-SÁNCHEZ, L. O. 2010. Algoritmos genéticos para la calibración del modelo climático de un invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16(1): 23-30.
- HASNI, A.; DRAOUI, B.; BOULARD, T.; TAIBI, R.; DENNAI, B. 2009. A particle swarm optimization of natural ventilation parameters in a greenhouse with continuous roof vents. *Sensors & Transducers Journal*. 102(39): 84-93.
- HÖLSCHER, T. 1989. Influence of thermal storage effects of the soil on greenhouse heat consumption. *Acta Hort.* 248: 415-422.
- JABULANI, J.; ZERMEÑO, A. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia* 37(6): 553-563.
- JOLLIET, O. 1994. Hortitrans. A model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 57: 23-37.
- KATSOULAS, N.; BARTZANAS, T.; BOULARD, T.; MERMIER, M.; KITTAS, C. 2006. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. *Biosystem Engineering* 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.
- LOPEZ-CRUZ, I. L.; ROJANO-AGUILAR, A.; OJEDA-BUSTA-MANTE, W.; SALAZAR-MORENO, R. 2007. Modelos ARX para predecir la temperatura del aire de un invernadero: Una metodología. *Agrociencia* 41: 181-192.
- LÓPEZ-CRUZ, I. L.; HERNÁNDEZ-LARRAGOITI, L. 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.
- LÓPEZ, J.; LORENZO, P.; MEDRANO, E.; SÁNCHEZ-GUERRERO, M. C.; PÉREZ, J.; PUERTO, H. M.; ARCO, M. 2000. Calefacción de invernaderos en el Sureste Español. *Caja Rural de Almería*. Junta de Andalucía. Almería, España. 46 p.
- MACÍAS-DUARTE, R.; GRIJALVA-CONTRERAS, R. L.; ROBLES-CONTRERAS, F. 2010. Efecto de tres volúmenes de agua en la productividad y calidad de tomate bola (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo condiciones de invernadero. *Biotechnia*. 12(2): 11-19.
- PILATTI, R. A. 1997. *Cultivos bajo invernaderos*. Hemisferio Sur S.A. Argentina. 166 p.
- SASE, S.; REISS, E.; BOTH, A. J.; ROBERTS, W. J. 2002. Developing a natural ventilation model for open-roof greenhouses. *Center for controlled environment agriculture*. Rutgers University. 9 p.
- SBITA, L.; BOULARD, T.; BAILLE, A.; ANNABI, M. 1998. A greenhouse climate model including the effects of ventilation and crop transpiration: validation for the South Tunisia conditions. *Acta Hort.* 458: 57-64.
- SBITA, L.; BOULARD, T.; MERMIER, M. 1999. Natural ventilation performance of a greenhouse tunnel in South Tunisia. *Cahiers Options Méditerranéens* 31: 109-118.
- SCHREVEVS, E.; JANCOSOK, P.; DIEUSSAERT, K. 2008. Uncertainty on estimated predictions of energy demand for dehumidification in a closed tomato greenhouse. *Acta Hort.* 801: 1347-1354.
- SEGINER, I.; KANTZ D.; PEIPER U. M.; LEVAV, N. 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.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. 2006. *Working with Dynamic Crop Models Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 447 p.
- WANG, S.; BOULARD, T. (2000). Predicting the microclimate in a naturally-ventilated plastic-house under Mediterranean climate. *J. Agr. Eng. Res.* 75(1): 27-38.
- ZHANG, Y.; MAHRER, Y.; MARGOLIN, M. 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.