

Dynamic energy balance model in a greenhouse with tomato cultivation: simulation, calibration and evaluation

Modelo dinámico de balance de energía en un invernadero con cultivo de tomate: simulación, calibración y evaluación

Raquel Salazar-Moreno*; Irineo L. López-Cruz; Ana Cristina Sánchez Cruz

Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.

Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, México, C. P. 56150, MÉXICO.

*Corresponding author: raquels60@hotmail.com.

Abstract

Control of the environmental conditions inside a greenhouse is fundamental to obtain high yields and product quality. One of the tools to improve this control is the mathematical modeling of the system in question. Therefore, in this work a dynamic energy balance model was developed with the objective of predicting the air temperature inside a greenhouse. The model considers the process of plant transpiration, ventilation and condensation inside a greenhouse, outside climate conditions, crop characteristics (leaf area index, stomatal and aerodynamic resistance), cover properties and greenhouse characteristics. The information used was collected in a greenhouse located at the *Universidad Autónoma Chapingo*, Mexico (19° 29' LN and 98° 53' LW), with a polyethylene cover, natural ventilation and tomato cultivation. The model was calibrated in order to obtain optimal values for six parameters: infiltration coefficient, heat transfer coefficient through the cover, heat transfer coefficient through the soil, crop-specific transpiration and wind effect coefficient. After calibration, the efficiency of the model improved by 33.84 %. The performance of the model was quite acceptable when evaluated with another set of data.

Keywords: temperature, transpiration, ventilation, condensation.

Resumen

El control de las condiciones ambientales dentro de un invernadero es fundamental para obtener altos rendimientos y calidad de los productos. Una de las herramientas para mejorar dicho control es el modelado matemático del sistema en cuestión. Por ello, en este trabajo se desarrolló un modelo dinámico de balance de energía con el objetivo de predecir la temperatura del aire dentro del invernadero. En el modelo se consideran el proceso de transpiración de la planta, la ventilación y condensación dentro del invernadero, las condiciones climatológicas externas, características del cultivo (índice de área foliar, resistencia estomática y aerodinámica), propiedades de la cubierta y características del invernadero. La información utilizada se recabó en un invernadero localizado en la Universidad Autónoma Chapingo, México (19° 29' latitud norte y 98° 53' longitud oeste), con cubierta de polietileno, ventilación natural y cultivo de tomate. El modelo se calibró con el fin de obtener valores óptimos para seis parámetros: coeficiente de infiltración, coeficiente de transferencia de calor de la cubierta, resistencia aerodinámica, coeficiente de intercambio de calor a través del suelo, transpiración específica del cultivo y coeficiente de efecto del viento. Después de la calibración, la eficiencia del modelo mejoró 33.8 % y su desempeño fue aceptable al evaluarlo con otro conjunto de datos.

Palabras clave: temperatura, transpiración, ventilación, condensación.



Introduction

According to Grijalva-Contreras, Macías-Duarte, and Robles-Contreras (2011), annual greenhouse yields of 24 tomato hybrids in the Caborca region of Mexico ranged from 26.7 to 31.1 kg·m⁻², while in the United Kingdom up to 52.6 kg·m⁻² per year are reported (Antón et al., 2012). An important element to raise the yields and quality of agricultural products in greenhouses is the control of climate variables, so it is necessary to know the behavior of those factors that directly affect them.

López-Cruz and Hernández-Larragoiti (2010) have described black box models that accurately predict variables such as temperature and relative humidity within a greenhouse, in which they apply neurodiffuse models with R² between 0.95 and 0.97. Likewise, Salazar-Moreno, López-Cruz, Rojano, Schmidt, and Dannehl (2015) used a dynamic neural network model to predict tomato yields in a semi-closed greenhouse with good performance, reflected by an R² of 0.97. However, this type of model has the disadvantage of not including information on mass and energy transfer processes, nor on the parameters that intervene in them; contrary to the dynamic models of the climate inside the greenhouse, which also provide information on the heat exchange processes.

The energy balance within greenhouses includes all modes of heat transfer (by thermal radiation, conduction and convection), as described in the models used by Al-Jamal (1994), Arinze, Schoenau, and Besant (1984), Baille (1999), Boulard and Baille (1987), Kindelan (1980), Rodríguez, Berenguel, Guzman, and Ramírez-Arias (2015), van Beveren, Bontsema, van Straten, and van Henten (2015a y 2015b) and Walker (1965). The first component of the energy balance is the solar radiation that falls on the greenhouse cover, which can be transmitted, reflected or absorbed. The proportion of radiation that passes through the cover is known as transmissivity, and depends on the characteristics of the greenhouse cover and the type of radiation (direct or diffuse) (Hernández, Escobar, & Castilla, 2001). The cover isolates the internal atmosphere from outside climate conditions, so it acts as a link between both environments (Rodríguez et al., 2015). Another component of the energy balance is ventilation (natural or forced), which prevents excessive heating during the day, ensures minimum CO₂ levels and controls humidity (Castilla-Prados, 2007).

On the other hand, plant transpiration causes heat loss in the greenhouse, which depends on water vapor concentration, transpiration conductance, leaf area index, net crop radiation and stomatal resistance that limits transpiration (Bakker, Bot, Challa, & Braak, 1995).

Introducción

De acuerdo con Grijalva-Contreras, Macías-Duarte, y Robles-Contreras (2011), los rendimientos anuales bajo invernadero de 24 híbridos de tomate en la región de Caborca, México, oscilaron entre 26.7 y 31.1 kg·m⁻², mientras que en el Reino Unido se reportan rendimientos de hasta 52.6 kg·m⁻² anuales (Antón et al., 2012). Un elemento importante para elevar los rendimientos y la calidad de los productos agrícolas en invernadero es el control de las variables climatológicas, por lo que es necesario conocer el comportamiento de aquellos factores que las afectan directamente.

López-Cruz y Hernández-Larragoiti (2010) han descrito modelos de caja negra que predicen de manera precisa variables como temperatura y humedad relativa dentro de un invernadero, en los cuales aplican modelos neurodifusos con R² entre 0.95 y 0.97. Asimismo, Salazar-Moreno, López-Cruz, Rojano, Schmidt, y Dannehl (2015) utilizaron un modelo dinámico de redes neuronales para predecir rendimientos de tomate en un invernadero semicerrado con buen desempeño, reflejado por una R² de 0.97. No obstante, este tipo de modelos tienen la desventaja de no incluir información sobre los procesos de transferencia de masa y energía, ni de los parámetros que intervienen en ellos; contrario a los modelos dinámicos del clima dentro del invernadero, que además proveen información sobre los procesos de intercambio de calor.

El balance de energía dentro del invernadero incluye todos los modos de transferencia de calor (por radiación térmica, conducción y convección), como se describe en los modelos empleados por Al-Jamal (1994), Arinze, Schoenau, y Besant (1984), Baille (1999), Boulard y Baille (1987), Kindelan (1980), Rodríguez, Berenguel, Guzman, y Ramírez-Arias (2015), van Beveren, Bontsema, van Straten, y van Henten (2015a y 2015b) y Walker (1965). El primer componente del balance de energía es la radiación solar que incide sobre la cubierta del invernadero, que puede ser transmitida, reflejada o absorbida. La proporción de radiación que atraviesa la cubierta se conoce como transmisividad, y depende de las características de la cubierta del invernadero y del tipo de radiación (directa o difusa) (Hernández, Escobar, & Castilla, 2001). La cubierta aísla la atmósfera interna de las condiciones climáticas externas, por lo que funge como un enlace entre ambos entornos (Rodríguez et al., 2015). Otro componente del balance energético es la ventilación (natural o forzada), la cual evita el calentamiento excesivo durante el día, asegura niveles mínimos de CO₂ y controla la humedad (Castilla-Prados, 2007).

Por otro lado, la transpiración de las plantas produce una pérdida de calor en el invernadero, que depende de la concentración de vapor de agua, la conductancia

Water vapor condensation in greenhouses, although not very large, constitutes another loss of heat to be considered in the energy balance, as well as that through the soil, which constitutes nearly 10 % of total losses (Rodríguez et al., 2015).

By knowing the outside climate variables (air temperature, wind speed and solar radiation), the properties of the cover and the crop and greenhouse specifications, a set of differential equations can be stated and solved simultaneously in order to describe the behavior of the air temperature inside the greenhouse with respect to time.

Based on the above, the objectives were: 1) to develop a dynamic energy balance model to predict the air temperature inside an experimental greenhouse with tomato cultivation, located at the *Universidad Autónoma Chapingo*, Mexico, b) to obtain the optimal values of the main parameters involved in the heat transfer processes through the calibration of the model and c) to evaluate the model for its use as a tool to optimize energy consumption in heating systems and control the greenhouse climate.

Materials and methods

Crop management

The study was conducted at the *Universidad Autónoma Chapingo*, Mexico, located at 19° 29' LN, 98° 53' LW and at an altitude of 2,240 m, for which we used a greenhouse 8 m wide by 15 m long (120 m²), with polyethylene cover, anti-insect netting, two side windows (6 m wide by 13 m long), a zenithal window (15 m long by 1 m wide) and a manual opening and closing system.

The commercial tomato (*Solanum lycopersicum* L.) hybrid "El Cid", of undetermined habit and saladette-type fruit, was used. Sowing was carried out on March 6, 2016 in 200-cavity polystyrene trays with peat moss as substrate, and on April 24 the seedlings were transplanted into volcanic sand substrate with a density of 3.5 plants·m⁻². They were fertilized with Steiner nutrient solution (Steiner, 1961) and tutoring was carried out according to crop needs. Pollination was done manually 15 days after transplant (dat) and the harvest started 125 dat.

For the measurement of climate variables, two HOBO weather stations were installed (Figure 1), one inside the greenhouse to record the inside temperature, soil temperature, global radiation and relative humidity. The sensors were placed in the center of the greenhouse and measurements were carried out every minute. In the case of roof temperature, two sensors were installed on the cover and the data were stored

de la transpiración, el índice de área foliar, la radiación neta del cultivo y la resistencia estomática que limita la transpiración (Bakker, Bot, Challa, & Braak, 1995). La condensación del vapor de agua en invernadero, aunque no es muy grande, constituye otra pérdida de calor a considerar en el balance energético; así como el suelo, que constituye cerca de 10 % del total de pérdidas (Rodríguez et al., 2015).

Al conocer las variables climatológicas externas (temperatura del aire, velocidad del viento y radiación solar), las propiedades de la cubierta, las especificaciones del cultivo y del invernadero, se puede plantear un conjunto de ecuaciones diferenciales y resolverlas de manera simultánea con el fin de describir el comportamiento de la temperatura del aire dentro del invernadero con respecto al tiempo.

Con base en lo anterior, los objetivos fueron: 1) desarrollar un modelo dinámico de balance de energía para predecir la temperatura del aire dentro de un invernadero experimental con cultivo de tomate, ubicado en la *Universidad Autónoma Chapingo*, México, b) obtener los valores óptimos de los principales parámetros involucrados en los procesos de transferencia de calor a través de la calibración del modelo y c) evaluar el modelo para su uso como una herramienta que permita optimizar el consumo de energía en sistemas de calefacción y controlar el clima en invernadero.

Materiales y métodos

Manejo del cultivo

El estudio se realizó en la *Universidad Autónoma Chapingo*, México, ubicada a los 19° 29' latitud norte, 98° 53' longitud oeste y 2,240 msnm, para lo cual se utilizó un invernadero de 8 m de ancho y 15 m de largo (120 m²), con cubierta de polietileno, malla anti insectos, dos ventanas laterales (6 m de ancho por 13 m de largo), una ventana cenital (15 m de largo por 1 m de ancho) y un sistema de apertura y cierre manual.

Se empleó el híbrido comercial de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) "El Cid", de hábito indeterminado y fruto tipo saladette. La siembra se realizó el 6 de marzo de 2016 en charolas de poliestireno de 200 cavidades con turba como sustrato, y el 24 de abril se trasplantó en sustrato de arena volcánica con densidad de 3.5 plantas·m⁻². Se fertilizó con la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) y el tutorado se realizó de acuerdo con las necesidades del cultivo. La polinización se hizo en forma manual 15 días después del trasplante (ddt) y la cosecha inició 125 ddt.

Para la medición de las variables climatológicas se instalaron dos estaciones meteorológicas HOBO

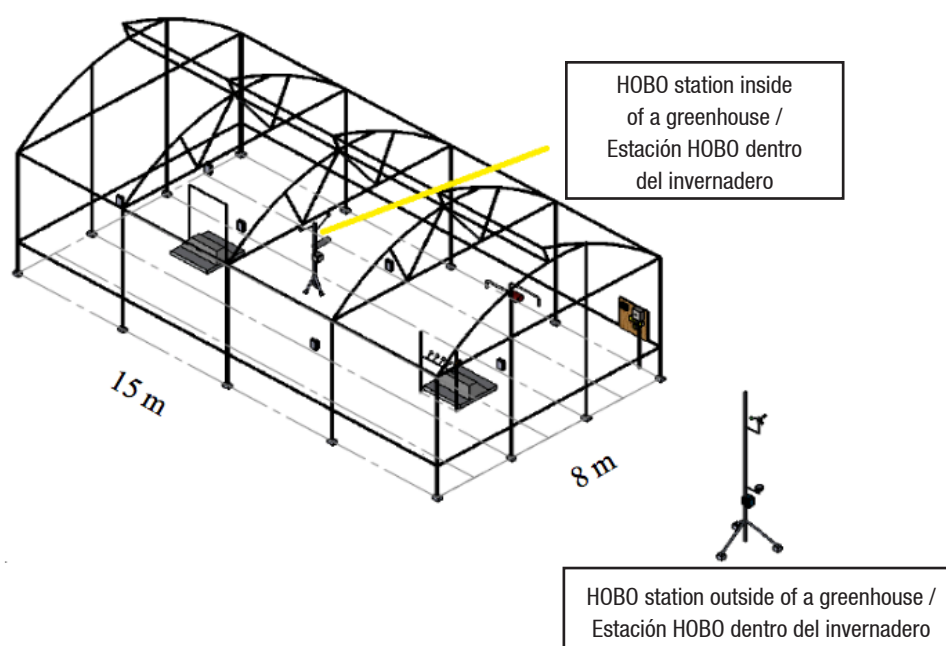


Figure 1. Location of the HOBO stations in the zenithal-type greenhouse (8 m wide by 15 m long) with natural ventilation, located at the Universidad Autónoma Chapingo, Mexico.

Figura 1. Ubicación de las estaciones HOBO en el invernadero tipo cenital (8 m de ancho y 15 m de largo) con ventilación natural, localizado en la Universidad Autónoma Chapingo, México.

every minute in a data acquisition system (datalogger). In addition, an anemometer was placed on the outside of the greenhouse 2.5 m from the ground to measure wind speed.

Dynamic energy balance model

The dynamic energy balance model is based on the models described by de Zwart (1997), van Beveren et al. (2015a and 2015b), van Henten and Bontsema (2009), van Ooteghem (2010) and Vanthoor, van Henten, Stanghellini, and de Visser (2011). Figure 2 shows the state variable air temperature (T_a), the inputs (heat gain due to solar radiation [Q_{soil}] and heat gain due to water vapor condensation on the roof [Q_{cond}]; both in $W \cdot m^{-2}$) and system outputs (heat loss through the cover [Q_{cov}], heat loss due to ventilation [Q_{vent}], heat loss through crop transpiration [Q_{trans}] and heat loss through the soil [Q_{soil}]; all in $W \cdot m^{-2}$).

Likewise, Figures 3 and 4 show the behavior of the dynamic model's input variables for 68 days (99,158 data in total), corresponding to the final tomato growth period (from June 18 to August 26, 2016).

The non-stationary state energy balance model for air temperature is given by the following ordinary differential equation, where the independent variable is time (t) and the dependent variable is the temperature of the air (T_a):

(Figura 1), una dentro del invernadero para registrar la temperatura interna, temperatura del suelo, radiación global y humedad relativa. Los sensores se ubicaron en el centro del invernadero y las mediciones se llevaron a cabo cada minuto. En el caso de la temperatura del techo, se instalaron dos sensores en la cubierta y los datos se almacenaron cada minuto en un sistema de adquisición de datos (datalogger). Además, se colocó un anemómetro en la parte exterior del invernadero a 2.5 m del suelo para medir la velocidad del viento.

Modelo dinámico de balance de energía

El modelo dinámico de balance de energía está basado en los modelos descritos por de Zwart (1997), van Beveren et al. (2015a y 2015b), van Henten y Bontsema (2009), van Ooteghem (2010) y Vanthoor, van Henten, Stanghellini, y de Visser (2011). En la Figura 2, se muestra la variable de estado temperatura del aire (T_a), las entradas (ganancia de calor debido a la radiación solar [Q_{soil}] y ganancia de calor debido a la condensación de vapor de agua en el techo [Q_{cond}]; ambas en $W \cdot m^{-2}$) y salidas del sistema (pérdida de calor a través de la cubierta [Q_{cov}], pérdida de calor debida a la ventilación [Q_{vent}], pérdida de calor por la transpiración del cultivo [Q_{trans}] y pérdida de calor a través del suelo [Q_{suelo}]; todas en $W \cdot m^{-2}$).

Asimismo, en las Figuras 3 y 4 se presenta el comportamiento de las variables de entrada del

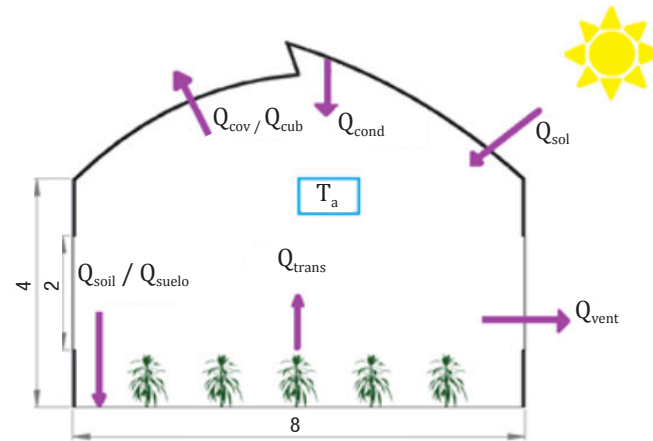


Figure 2. Energy flows involved in a greenhouse.

Figura 2. Flujos de energía que intervienen en un invernadero.

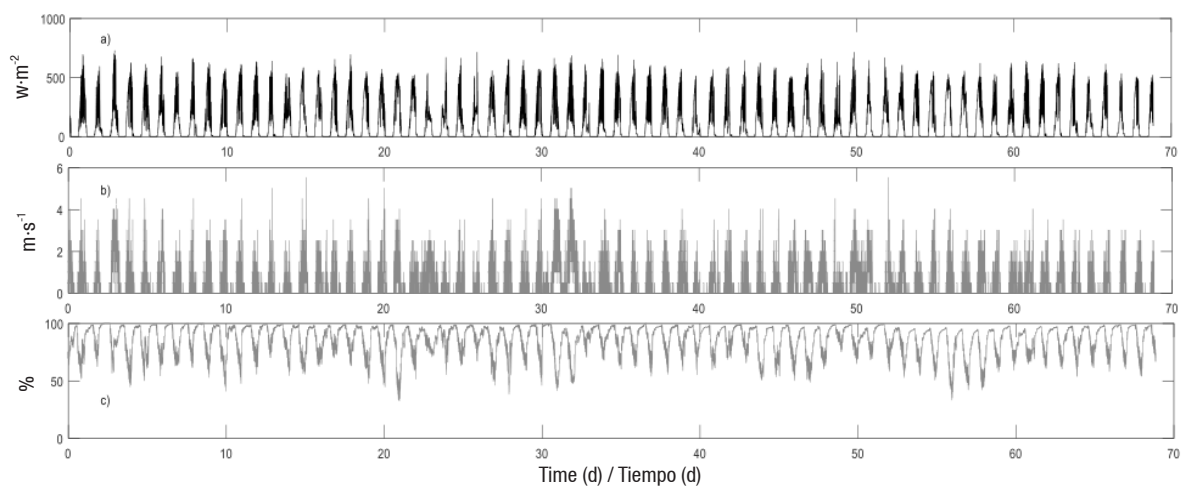


Figure 3. a) Solar radiation (inside), (b) wind speed (outside) and (c) relative humidity (inside), from June 18 to August 26, 2016 (68 days).

Figura 3. a) Radiación solar (dentro), b) velocidad del viento (fuera) y c) humedad relativa (dentro), del 18 junio al 26 de agosto de 2016 (68 días).

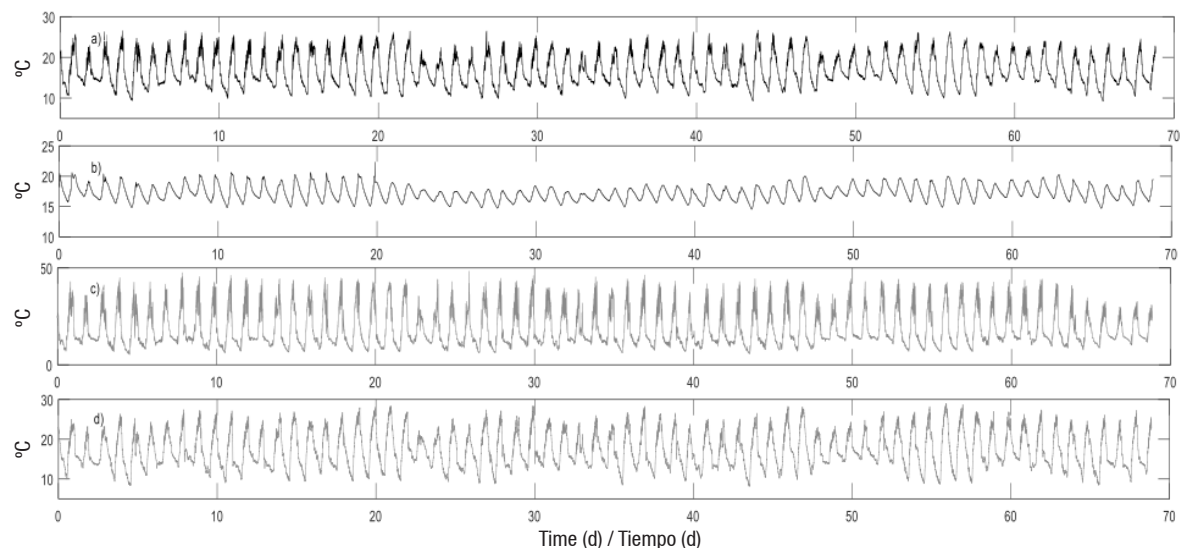


Figure 4. a) Temperature inside the greenhouse, (b) soil temperature, (c) cover temperature and (d) external temperature, from June 18 to August 26, 2016 (68 days).

Figura 4. a) Temperatura dentro del invernadero, b) temperatura del suelo, c) temperatura de la cubierta y d) temperatura externa, del 18 junio al 26 de agosto de 2016 (68 días).

$$VC_p\rho \frac{dT_a}{dt} = (Q_{sol} - Q_{cov} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{soil} + Q_{cond}) \quad (1)$$

If the energy flows per unit area ($W \cdot m^{-2}$) are considered, Equation (1) is modified and instead of the volume (V, m^3) we have h :

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{hC_p\rho} (Q_{sol} - Q_{cov} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{soil} + Q_{cond}) \quad (2)$$

where $h = \frac{V}{A_s}$. The description of the parameters and the variables included in the model are shown in Tables 1 and 2.

On the other hand, Q_{sol} can be expressed as:

$$Q_{sol} = \tau_{tot} I_{rad} \quad (3)$$

modelo dinámico para 68 días (99,158 datos en total), correspondientes al periodo final de crecimiento del tomate (del 18 de junio al 26 de agosto de 2016).

El modelo de balance de energía en estado no estacionario para la temperatura del aire está dado por la siguiente ecuación diferencial ordinaria, donde la variable independiente es el tiempo (t) y la variable dependiente T_a :

$$VC_p\rho \frac{dT_a}{dt} = (Q_{sol} - Q_{cub} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{suelo} + Q_{cond}) \quad (1)$$

Si se consideran los flujos de energía por unidad de área ($W \cdot m^{-2}$), la Ecuación (1) se modifica y en lugar del volumen (V, m^3) se tiene h :

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{hC_p\rho} (Q_{sol} - Q_{cub} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{suelo} + Q_{cond}) \quad (2)$$

Table 1. Value of the parameters used in the simulation.

Cuadro 1. Valor de los parámetros utilizados en la simulación.

Symbol/ Símbolo	Description/Descripción	Units/Unidades	Value/Valor
V	Greenhouse volume/Volumen del invernadero	m^3	630.00
A_s	Greenhouse floor area/Área del piso del invernadero	m^2	120.00
A_c	Cover area/Área de la cubierta	m^2	345.30
A_{vent}	Ventilation area/Área de ventilación	m^2	171.00
l_0	Window length/Longitud de las ventanas	m	3.20
w_0	Window width/Ancho de las ventanas	m	0.80
p_s	Depth at which soil temperature is estimated/ Profundidad a la que se estima la temperatura del suelo	m	0.05
C_p	Specific heat of the air/Calor específico del aire	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	1000.00
ρ	Air density/Densidad del aire	$kg \cdot m^{-3}$	1.22
α_c	Heat transfer coefficient of the cover/ Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	5
τ_{tot}	Solar radiation transmission coefficient/ Coeficiente de transmisión de la radiación solar	-	1
k_s	Heat transfer coefficient through soil/ Coeficiente de intercambio de calor a través del suelo	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	5.75
k	Crop-specific transpiration parameter/ Parámetro de transpiración específica del cultivo	-	0.40
k_{po}	Mass transfer coefficient/Coeficiente de transferencia de masa	$m \cdot s^{-1}$	0.002532
r_b	Aerodynamic resistance/Resistencia aerodinámica	$s \cdot m^{-1}$	200
λ	Latent heat of vaporization/Calor latente de vaporización	$KJ \cdot kg^{-1}$	2,500
LAI	Leaf area index/Índice de área foliar	$cm^2 \cdot cm^{-2}$	2.2
P	Atmospheric pressure/Presión atmosférica	$m \cdot s^{-2}$	98.1
F_0	Pressure loss coefficient/Coeficiente de pérdida de presión	-	
C_f	Infiltration coefficient/Coeficiente de infiltración	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$	0.008361
C_d	Discharge coefficient/Coeficiente de descarga	-	0.6497
C_w	Wind effect coefficient/Coeficiente de efecto del viento	-	0.14

Table 2. Energy balance variables.**Cuadro 2. Variables de balance de energía.**

Symbol/ Símbolo	Description/Descripción	Units/ Unidades
I_{rad}	Outside solar radiation/Radiación solar externa	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Q_{sol}	Heat gain due to solar radiation/Ganancia de calor debido a la radiación solar	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Q_{cond}	Heat gain due to condensation/Ganancia de calor debido a la condensación	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$Q_{\text{cov}}/Q_{\text{cub}}$	Heat gain through the cover/Pérdida de calor a través de la cubierta	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Q_{trans}	Heat gain due to crop transpiration/Pérdida de calor por la transpiración del cultivo	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$Q_{\text{soil}}/Q_{\text{suelo}}$	Heat loss through the soil/Pérdida de calor a través del suelo	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Q_{vent}	Heat loss due to ventilation/Pérdida de calor debido a la ventilación	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
φ_{cond}	Condensation conductance/Conductancia de condensación	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
R_n	Net radiation at crop level/Radiación neta a nivel cultivo	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
T_a	Inside temperature/Temperatura interior	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Cover temperature/Temperatura de la cubierta	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Soil temperature/Temperatura del suelo	$^{\circ}\text{C}$
T_e	Outside temperature/Temperatura exterior	$^{\circ}\text{C}$
RH_e/HR_e	Outside relative humidity/Humedad relativa externa	%
$\text{RH}_{\text{in}}/\text{HR}_{\text{in}}$	Inside relative humidity/Humedad relativa interna	%
χ_{cul}	Absolute water vapor concentration in the crop/ Concentración de vapor de agua absoluto en el cultivo	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
χ	Water vapor concentration in the greenhouse/ Concentración de vapor de agua en el invernadero	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
χ_{sat}	Saturated water vapor concentration/Concentración de vapor de agua saturado	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ε	Ratio of the latent to sensible heat content of saturated air/ Relación entre calor latente sensible	-
G_E	Transpiration conductance/Conductancia de la transpiración	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
ϕ_{cond}	Condensation flow/Flujo de condensación	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
r_s	Stomatal resistance/Resistencia estomática	$\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$
v_e	Outside air velocity/Velocidad del aire exterior	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
T_{s_v}	Infiltration rate per unit floor area/Tasa de infiltración por unidad de área de piso	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
T_v	Ventilation rate per unit floor area/Tasa de ventilación por unidad de área de piso	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
t	Time/Tiempo	s

Since solar radiation was measured inside the greenhouse, the value of 1 was taken for the solar radiation transmission coefficient (τ_{tot}), while Q_{cov} is based on the model of van Beveren et al. (2015b) (Equation 4).

$$Q_{\text{cov}} = \alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e) \quad (4)$$

The model proposed by Stanghellini and Jong (1995) was used to calculate the greenhouse tomato Q_{trans} :

$$Q_{\text{trans}} = G_E \lambda (\chi_{\text{cul}} - \chi) \quad (5)$$

where the latent heat value of vaporization (λ) reported by Monteith and Unsworth was considered ($\lambda = 2,500 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$), whereas transpiration conductance (G_E) (van Beveren et al., 2015b), ratio of latent to sensible heat content of

donde $h = \frac{V}{A_s}$. La descripción de los parámetros y las variables incluidas en el modelo se muestran en los Cuadros 1 y 2.

Por otro lado, Q_{sol} se puede expresar como:

$$Q_{\text{sol}} = \tau_{\text{tot}} I_{\text{rad}} \quad (3)$$

Dado que la radiación solar se midió dentro del invernadero, se tomó el valor de 1 para el coeficiente de transmisión de la radiación solar (τ_{tot}). Mientras que, la Q_{cub} está basada en el modelo de van Beveren et al. (2015b) (Ecuación 4).

$$Q_{\text{cub}} = \alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e) \quad (4)$$

saturated air (ε), stomatal resistance parameter (r_s) and net radiation (R_n) at crop level (Bontsema et al., 2007) are given by the following equations:

$$G_E = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad (6)$$

$$\varepsilon = 0.7584e^{0.0518T_a} \quad (7)$$

$$r_s = \left(82 + 570e^{-\frac{kR_n}{LAI}}\right)(1 + 0.023(T_a - 20)^2) \quad (8)$$

$$R_n = 0.86(1 - \exp(-0.7LAI))Q_{sol} \quad (9)$$

The water vapor concentration in the crop (X_{cul}) and the saturated vapor concentration (X_{sat}) in Equations 10 and 11, respectively:

$$X_{cul} = X_{sat} + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \quad (10)$$

$$X_{sat} = 5.563e^{0.0572T_a} \quad (11)$$

On the other hand, the Q_{vent} was obtained with the equation described by Ruiz-García, López-Cruz, Arteaga-Ramírez, and Ramírez-Arias (2015):

$$Q_{vent} = T_v * \rho * C_p * (T_a - T_e) \quad (12)$$

where the ventilation rate (T_v ; Baeza et al., 2014) and the discharge coefficient (C_d ; Ruiz-García et al., 2015) are given by:

$$T_v = \left(\frac{A_{vent}}{2}\right)(C_d)\sqrt{C_w} * v_e + Ts_v \quad (13)$$

$$C_d = F_0^{-0.5}; F_0 = 1.75 + 0.7e^{-\frac{l_0}{w_0}/32.5} \quad (14)$$

Replacing the window width and length values gives a value of $C_d = 0.6497$. In terms of the wind effect coefficient (C_w), Ruiz-García et al. (2015) report a value of 0.16 for a greenhouse with an area of 2,565 m², while Roy, Boulard, Kittas, and Wang (2002) and Valera, Molina, and Álvarez (2008) present a value of 0.14 for a 179 m² greenhouse, which was used in this work.

The first part of Equation 13 is ventilation through windows, while the second part is ventilation due to leakage from the greenhouse construction, or infiltration rate (Ts_v):

$$Ts_v = C_f * A_s \quad (15)$$

The heat gain due to condensation was obtained with the equation of Speetjens, Stigter, and van Straten (2010):

$$Q_{cond} = \lambda(\varphi_{cond}) \quad (16)$$

where the condensation conductance (φ_{cond}) was calculated as follows:

Para el cálculo de la Q_{trans} de tomate en invernadero se utilizó el modelo propuesto por Stanghellini y Jong (1995):

$$Q_{trans} = G_E\lambda(X_{cul} - \chi) \quad (5)$$

donde se consideró el valor del calor latente de vaporización (λ) reportado por Monteith y Unsworth (2013) ($\lambda = 2,500 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$). Mientras que, la conductancia de transpiración (G_E) (van Beveren et al., 2015b), la relación entre calor latente y sensible del contenido del aire saturado (ε), el parámetro de resistencia estomática (r_s) y la radiación neta (R_n) a nivel del cultivo (Bontsema et al., 2007) están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$G_E = \frac{2IAF}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad (6)$$

$$\varepsilon = 0.7584e^{0.0518T_a} \quad (7)$$

$$r_s = \left(82 + 570e^{-\frac{kR_n}{IAF}}\right)(1 + 0.023(T_a - 20)^2) \quad (8)$$

$$R_n = 0.86(1 - \exp(-0.7IAF))Q_{sol} \quad (9)$$

La concentración de vapor de agua en el cultivo (X_{cul}) y la concentración del vapor saturado (X_{sat}) se muestran en las Ecuaciones 10 y 11, respectivamente:

$$X_{cul} = X_{sat} + \varepsilon \frac{r_b}{2IAF} \frac{R_n}{\lambda} \quad (10)$$

$$X_{sat} = 5.563e^{0.0572T_a} \quad (11)$$

Por otro lado, la Q_{vent} se obtuvo con la ecuación descrita por Ruiz-García, López-Cruz, Arteaga-Ramírez, y Ramírez-Arias (2015):

$$Q_{vent} = T_v * \rho * C_p * (T_a - T_e) \quad (12)$$

en donde la tasa de ventilación (T_v ; Baeza et al., 2014) y el coeficiente de descarga (C_d ; Ruiz-García et al., 2015) están dados por:

$$T_v = \left(\frac{A_{vent}}{2}\right)(C_d)\sqrt{C_w} * v_e + Ts_v \quad (13)$$

$$C_d = F_0^{-0.5}; F_0 = 1.75 + 0.7e^{-\frac{l_0}{w_0}/32.5} \quad (14)$$

Sustituyendo los valores de ancho y largo de las ventanas, se obtiene un valor de $C_d = 0.6497$. En cuanto al coeficiente de efecto del viento (C_w), Ruiz-García et al. (2015) reportan un valor de 0.16 para un invernadero con una superficie de 2,565 m²; mientras que Roy, Boulard, Kittas, y Wang (2002) y Valera, Molina, y Álvarez (2008) presentan un valor de 0.14 para un invernadero de 179 m², el cual se utilizó en este trabajo.

La primera parte de la Ecuación 13 es la ventilación por las ventanas, mientras que la segunda parte es la

$$\varphi_{\text{cond}} = k_{\text{po}} * \rho * A_c * (\chi - \chi_{\text{sat}}) \quad (17)$$

For this equation, the mass transfer coefficient (k_{po}) determines the condensation rate, and the X_{sat} and the water vapor concentration in the greenhouse (X) are given by:

$$\chi_{\text{sat}}(T_c) = 0.611[1 + 1.414 \sin(5.82e^{-3}T_c)]^{8.827} \quad (18)$$

$$\chi = \frac{0.611HR_{\text{in}} \chi_{\text{sat}}(T_a)}{100P} \quad (19)$$

For the conversion of relative to absolute humidity, the expression proposed by Blasco, Martínez, Herrero, and Ramos (2007) (Equation 20) was used, which is a function that ensures that relative humidity will never be greater than 100 %.

$$RH_{\text{in}}(T_a) = \begin{cases} 100, & RH_{\text{in}} > 100 \\ RH_{\text{in}}, & RH_{\text{in}} \leq 100 \end{cases} \quad (20)$$

Finally, the Q_{soil} was estimated with the equation of de van Ooteghem (2010). The depth at which soil temperature was estimated was 0.05 m in the first soil layer:

$$Q_{\text{soil}} = \frac{k_s A_s (T_a - T_s)}{p_s} \quad (21)$$

The MATLAB/SIMULINK programming environment was used to generate the computational model. This consists of a main program where parameters are defined (input and output variables, as well as simulation options) and a C-MEX file (S-function) where the model equations are implemented, which is called by a SIMULINK mdl file. The numerical simulation was performed with the Runge-Kutta 4th order integration method, known as Matlab's ode45 function Dormand-Prince method, with step size of variable integration, and relative and absolute tolerance of 1×10^{-8} and 1×10^{-10} respectively. A total of 99,158 data were available to construct, calibrate, and evaluate the model.

Calibration

Calibration of a model is the process of altering the parameters to obtain a better fit of the model with respect to the measured data; in addition, it is a non-linear optimization problem, where the objective is to minimize the mean square error (MSE) between the measured variable (y_i) and the simulated one (\hat{y}_i), which is subject to the lower and upper limits of the parameters:

$$\text{Min} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}; L_{\text{ipi}} < p_i < L_{\text{Spi}} \quad (22)$$

where L_{ipi} and L_{Spi} are the lower and upper limit of the value of the model parameters, respectively, and p_i is the i^{th} parameter with $i = 1, \dots, n$.

The nonlinear least squares procedure (Matlab lsqnonlin function) was used to calibrate the parameters.

ventilación debida a las fugas de la construcción del invernadero, o tasa de infiltración (Ts_v):

$$Ts_v = C_f * A_s \quad (15)$$

La ganancia de calor debida a la condensación se obtuvo con la ecuación de Speetjens, Stigter, y van Straten (2010):

$$Q_{\text{cond}} = \lambda(\varphi_{\text{cond}}) \quad (16)$$

donde la conductancia de condensación (φ_{cond}) se calculó de la siguiente manera:

$$\varphi_{\text{cond}} = k_{\text{po}} * \rho * A_c * (\chi - \chi_{\text{sat}}) \quad (17)$$

Para esta ecuación, el coeficiente de transferencia de masa (k_{po}) determina la tasa de condensación, y la X_{sat} y la concentración de vapor de agua en el invernadero (X) están dadas por:

$$\chi_{\text{sat}}(T_c) = 0.611[1 + 1.414 \sin(5.82e^{-3}T_c)]^{8.827} \quad (18)$$

$$\chi = \frac{0.611HR_{\text{in}} \chi_{\text{sat}}(T_a)}{100P} \quad (19)$$

Para la conversión de la humedad relativa a absoluta se utilizó la expresión propuesta por Blasco, Martínez, Herrero, y Ramos (2007) (Ecuación 20), la cual es una función que asegura que la humedad relativa nunca será mayor que 100 %.

$$RH_{\text{in}}(T_a) = \begin{cases} 100, & RH_{\text{in}} > 100 \\ RH_{\text{in}}, & RH_{\text{in}} \leq 100 \end{cases} \quad (20)$$

Finalmente, el Q_{suelo} se estimó con la ecuación de van Ooteghem (2010). La profundidad a la que se estimó la temperatura del suelo fue a 0.05 m en la primera capa del suelo:

$$Q_{\text{suelo}} = \frac{k_s A_s (T_a - T_s)}{p_s} \quad (21)$$

Para generar el modelo computacional se utilizó el ambiente de programación MATLAB/SIMULINK. Este consta de un programa principal donde se definen los parámetros (variables de entrada y salidas, así como las opciones de simulación) y un archivo C-MEX (S-function) donde se implementan las ecuaciones del modelo, que es llamado por un archivo mdl de SIMULINK. La simulación numérica se realizó con el método de integración tipo Runge-Kutta de 4^o orden, conocido como método Dormand-Prince función ode45 de Matlab, con tamaño de paso de integración variable, y tolerancia relativa de 1×10^{-8} y absoluta de 1×10^{-10} . Se dispuso de 99,158 datos en total para construir, calibrar y evaluar el modelo.

Calibración

La calibración de un modelo es el proceso de alterar los parámetros para obtener un mejor ajuste del

Fit measurements

In order to know the accuracy of the model's prediction in relation to the measured variables, we used the *MSE*, mean absolute error (*MAE*), root mean squared error (*RMSE*), root mean absolute error (*RMAE*) and efficiency (*EF*) (Equations 23 to 27) (Wilks, 2011). The last statistical measure is one of the most important to determine the model's behavior. On the other hand, the *MSE*, when calculated with squared prediction errors, is more sensitive to large deviations and outliers; therefore, an alternative to determine the error of the model is the *MAE*, which like the *MSE* avoids the compensation between the under or over prediction (Wallach, Makowski, Jones, & Brun, 2013).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (23)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (24)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (25)$$

$$RMAE = \sqrt{MAE} \quad (26)$$

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (27)$$

If the model is perfect, the predicted values will be equal to those observed or measured ($y_i = \hat{y}_i$); therefore, the model's efficiency will be 1. On the contrary, a model with $EF = 0$ means that the predicted value is equal to the mean and the second part of Equation 27 is equal to 1, so it will not be a good model. If $EF < 0$, it means that the predictor is a worse estimator than the mathematical expectation. The fit measures were used both in the estimation of model parameters (calibration) and in the evaluation stage.

Results

The climate variables, both inside (air, floor and roof temperatures, solar radiation, relative humidity) and outside (temperature and wind speed), were obtained every minute. Of a total of 99,158 available data, 48 % (47,997 data, from June 18 to July 22, 2016) were used to construct and calibrate the model, and 52 % (51,153 data, from July 22 to August 26, 2016) to evaluate it.

The model's simulation results for the air temperature inside the greenhouse were compared with the observed data (Figure 5). In addition, different statistical fit measures were obtained (Table 3) to determine the closeness between the air temperature measurements and the dynamic model's predictions.

modelo con respecto a los datos medidos; además, es un problema de optimización no lineal, en donde el objetivo es minimizar el error cuadrado medio (*ECM*) entre la variable medida (y_i) y la simulada (\hat{y}_i), lo cual está sujeto a los límites inferiores y superiores de los parámetros:

$$\text{Min} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}; L_{lpi} < p_i < L_{spi} \quad (22)$$

donde L_{lpi} y L_{spi} son el límite inferior y superior del valor de los parámetros del modelo, respectivamente, y p_i es el i -ésimo parámetro con $i = 1, \dots, n$.

Para calibrar los parámetros se utilizó el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales (función *lsqnonlin* de Matlab).

Medidas de ajuste

Con el fin de conocer la precisión de la predicción del modelo en relación con las variables medidas, se utilizó el *ECM*, el error absoluto medio (*EAM*), la raíz del error cuadrado medio (*RECM*), la raíz del error absoluto medio (*REAM*) y la eficiencia (*EF*) (Ecuaciones 23 a 27) (Wilks, 2011). La última medida estadística es una de las más importantes para determinar el comportamiento del modelo. Por su parte, el *ECM*, al ser calculado con los errores de la predicción al cuadrado, es más sensible a desviaciones grandes y valores atípicos; por lo que una alternativa para determinar el error del modelo es el *EAM*, que al igual que el *ECM* evita la compensación entre la sub o sobre predicción (Wallach, Makowski, Jones, & Brun, 2013).

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (23)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (24)$$

$$RECM = \sqrt{ECM} \quad (25)$$

$$REAM = \sqrt{EAM} \quad (26)$$

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (27)$$

Si el modelo es perfecto, los valores predichos serán iguales a los observados o medidos ($y_i = \hat{y}_i$); por ende, la eficiencia del modelo será 1. Por el contrario, un modelo con $EF = 0$ significa que el valor predicho es igual a la media y la segunda parte de la Ecuación 27 es igual a 1, por lo que no será un buen modelo. Si $EF < 0$, quiere decir que el predictor es peor estimador que la esperanza matemática. Las medidas de ajuste se usaron tanto en la estimación de parámetros del modelo (calibración) como en la etapa de evaluación.

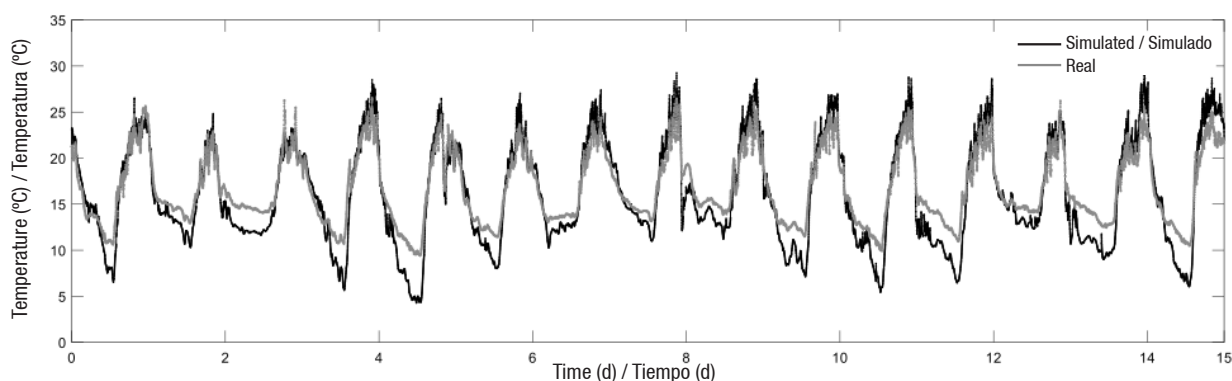


Figure 5. Comparison between the air temperature measured inside the greenhouse and that simulated by the model before calibration.

Figura 5. Comparación entre la temperatura dentro del invernadero medida y la simulada por el modelo antes de la calibración.

Table 3. Fit measurements between measured and simulated temperature by the model.

Cuadro 3. Medidas de ajuste entre la temperatura medida y simulada por el modelo.

Fit measurements/ Medidas de ajuste	Before calibration/ Antes de la calibración	After calibration/ Después de la calibración	Model evaluation/ Evaluación del modelo
MSE ¹ /ECM ¹	5.0887	1.51	1.8006
RMSE/RECM	2.2558	1.23	1.3419
MAE/EAM	1.8641	0.99	1.0894
RMAE/REAM	0.1118	0.097	0.0646
EF	0.6571	0.89	0.8674

¹MSE = mean square error; RMSE = root mean squared error; MAE = mean absolute error; RMAE = root mean absolute error; EF = efficiency.

¹ECM = error cuadrado medio; RECM = raíz del error cuadrado medio; EAM = error absoluto medio; REAM = la raíz del error absoluto medio; EF = eficiencia.

In the model developed, eight parameters are related to greenhouse dimensions (V , A_s , A_c , A_{vent} , l_0 , w_0 , p_s , F_0) and four are constant (C_p , ρ , λ , P); also, the τ_{tot} was equal to 1, since the solar radiation was measured inside the greenhouse. Due to the above, the sensitivity analysis was not performed, so the model was directly calibrated to improve its performance with the remaining parameters: aerodynamic resistance (r_v), heat transfer coefficient of the cover (α_c), soil heat exchange coefficient (k_s), crop-specific transpiration parameter (k), infiltration coefficient (C_f) and wind effect coefficient (C_w). The initial values of these parameters were obtained from the literature (Table 4), which were varied in different percentages with respect to the nominal values. The range of variation that generated the best results is shown in Table 4.

Model performance improved substantially after calibration (Figure 6 and Table 4), where the percentage change in the decrease of MSE, AME, RMSE and RMAE was 70.32, 46.89, 45.47 and 13.23 %, respectively, and the percentage change in increased efficiency was 35.44 %.

Once calibrated, the developed model can be used as a black box to test its performance with different information; that is, it also predicts responses when fed with new information. This is known as model evaluation,

Resultados

Las variables climáticas, tanto internas (temperaturas del aire, suelo y techo, radiación solar, humedad relativa) como externas (temperatura y velocidad del viento), se obtuvieron cada minuto. De un total de 99,158 datos disponibles, 48 % (47,997 datos, del 18 junio al 22 julio de 2016) se utilizaron para construir y calibrar el modelo, y 52 % (51,153 datos, del 22 julio al 26 agosto de 2016) para evaluarlo.

Los resultados de la simulación del modelo para la temperatura del aire dentro del invernadero se compararon con los datos observados (Figura 5). Además, se obtuvieron diferentes medidas estadísticas de ajuste (Cuadro 3) para determinar la cercanía entre las mediciones de la temperatura del aire y las predicciones del modelo dinámico.

En el modelo desarrollado, ocho parámetros están relacionados con las dimensiones del invernadero (V , A_s , A_c , A_{vent} , l_0 , w_0 , p_s , F_0) y cuatro son constantes (C_p , ρ , λ , P); además, el τ_{tot} fue igual a 1, ya que la radiación solar se midió dentro del invernadero. Debido a lo anterior, no se realizó el análisis de sensibilidad, por lo que se hizo directamente la calibración del modelo para mejorar su desempeño con los parámetros

which was implemented with 52 % of the data (Table 4 and Figure 7). On the other hand, the energy balance model predicts in an acceptable way the variation of the air temperature inside the greenhouse.

restantes: resistencia aerodinámica (r_b), coeficiente de transferencia de calor de la cubierta (α_c), coeficiente de intercambio de calor a través del suelo (k_s), parámetro de transpiración específica del cultivo (k),

Table 4. Nominal value and variation of the parameters to be calibrated.

Cuadro 4. Valor nominal y variación de los parámetros a calibrar.

Nominal value / Valor nominal	Reference / Referencia	Variation range / Rango de variación	Optimal values after calibration / Valores óptimos después de la calibración
$C_f^1 = 0.008361$	Ruiz-García et al. (2015)	$0.00418 < C_f < 0.0125$	$C_f = 0.0125$
$\alpha_c = 5$	van Beveren et al. (2015b)	$1 < \alpha_c < 10$	$\alpha_c = 10$
$r_b = 200$	Bontsema et al. (2007)	$100 < r_b < 300$	$r_b = 300$
$k_s = 5.75$	Leal (2008)	$1 < k_s < 20$	$k_s = 1$
$k = 0.4$	van Beveren et al. (2015b)	$0.008 < k < 0.6$	$k = 0.008$
$C_w = 0.14$	Valera et al. (2008) Roy et al. (2002)	$0.05 < C_w < 0.2$	$C_w = 0.2$

¹ C_f = infiltration coefficient; α_c = heat transfer coefficient through the cover; r_b = aerodynamic resistance; k_s = heat transfer coefficient through soil; k = crop-specific transpiration parameter; C_w = wind effect coefficient.

¹ C_f = coeficiente de infiltración; α_c = coeficiente de transferencia de calor de la cubierta; r_b = resistencia aerodinámica; k_s = coeficiente de intercambio de calor a través del suelo; k = parámetro de transpiración específica del cultivo; C_w = coeficiente de efecto del viento.

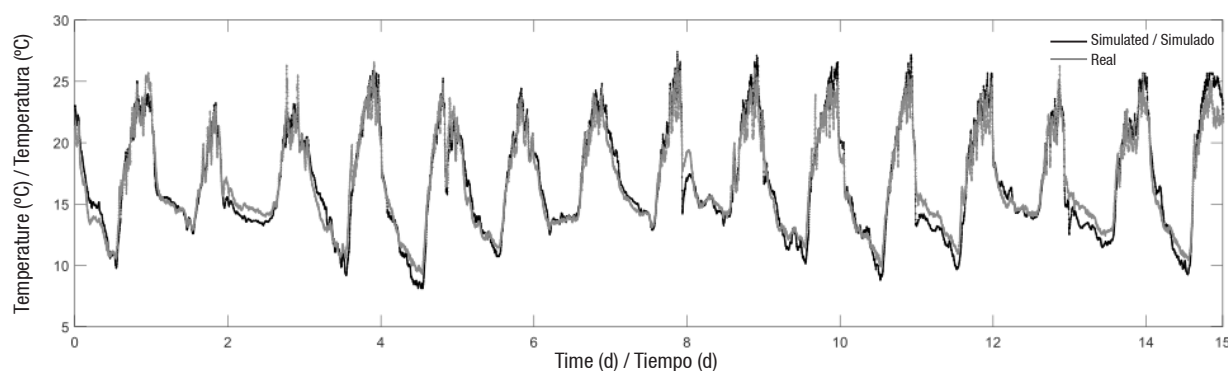


Figure 6. Comparison between the air temperature measured inside the greenhouse and that simulated by the model after calibration.

Figura 6. Comparación entre la temperatura del aire dentro del invernadero medida y la simulada por el modelo después de la calibración.

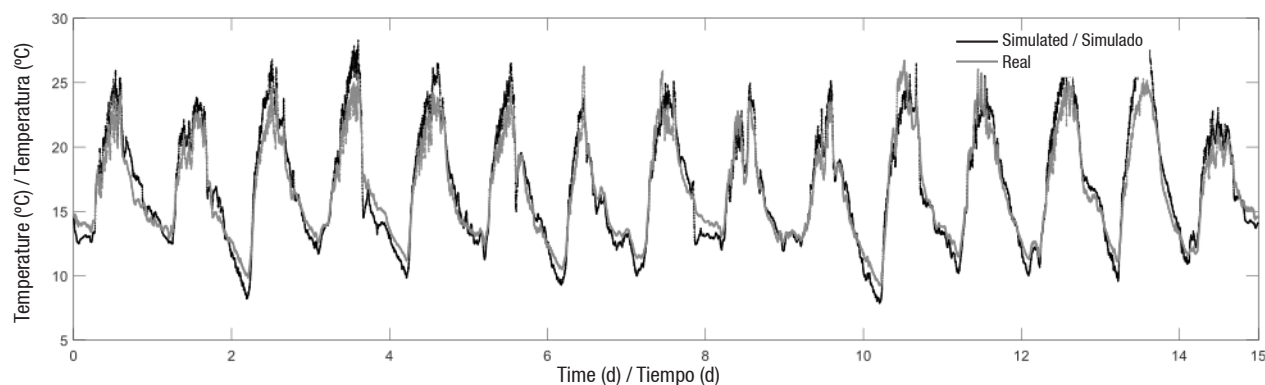


Figure 7. Prediction of the air temperature with the values of the parameters estimated in the calibration and a new dataset (model evaluation).

Figura 7. Predicción de la temperatura del aire con los valores de los parámetros estimados en la calibración y un nuevo conjunto de datos (evaluación del modelo).

Discussion

In relation to the results of the model calibration, the value of the parameters (Table 3) was compared with the results obtained by other researchers. The value of the r_b found is higher than the typical one suggested by Bontsema et al. (2007) for a Dutch greenhouse with tomato cultivation ($r_b = 200 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$), but is similar to that obtained by Qiu et al. (2010) for tomato in a solar greenhouse in China ($r_b = 295 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$).

The C_w depends on greenhouse dimensions and wind speed, so after calibration a slightly higher value ($C_w = 0.2$) was obtained than that found by Ruiz-García et al. (2015) ($C_w = 0.16$) for a polyethylene greenhouse with tomato cultivation. However, it is within the range of values reported by Molina-Aiz, Valera, Peña, Gil, and López (2009) (between 0.16 and 0.82). Likewise, the C_f was higher ($0.0125 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) than that obtained by Ruiz-García et al. (2015), which means that the model overestimates the infiltration rate.

On the other hand, the α_c is higher ($10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) than that reported by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2002) for plastic (between 6 and $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) and glass ($8.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) greenhouses, while the optimal value found for the k_s ($1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) is equal to that reported by Valera et al. (2008) for dry soil, and is within the range of the values obtained by Abu-Hamdeh and Reeder (2000) for sandy soil (between 0.58 and $1.94 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) and sandy loam soil (between 0.19 and $1.12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$). Finally, the k was lower than the level proposed by van Beveren et al. (2015b), which implies that more research is needed to determine the role of this parameter, by using a value close to nominal (reported in the literature), on the quality of the model prediction.

The under and overestimation of the parameters can be attributed to the fact that in the construction, calibration and evaluation of the model, the ventilation area was considered constant, since the greenhouse was open most of the time; only the vents were closed in rainy weather from 7:00 pm to 8:00-8:30 am. The latter was not considered in the model, and its inclusion could improve its performance. In addition, the leaf area index was considered constant, but its inclusion as an input variable could improve the estimation of transpiration.

As for the approach of the model as a single energy balance equation for estimating the temperature inside the greenhouse, it is considered that it can be improved by including non-stationary state balances at the cover, plant and soil level, and by using a system of ordinary differential equations and not just an equation in the balance. That is, carrying out balances in several layers

coeficiente de infiltración (C_f) y coeficiente de efecto del viento (C_w). Los valores iniciales de estos parámetros se obtuvieron de la literatura (Cuadro 4), los cuales se hicieron variar en diferentes porcentajes respecto a los valores nominales. El rango de variación que generó mejores resultados se muestra en el Cuadro 4.

El desempeño del modelo mejoró sustancialmente después de la calibración (Figura 6 y Cuadro 4), donde el porcentaje de cambio de la disminución del *ECM*, *EAM*, *RECM* y *REAM* fue de 70.32, 46.89, 45.47 y 13.23 %, respectivamente, y el cambio porcentual de incremento en la eficiencia fue 35.44 %.

Una vez calibrado, el modelo desarrollado se puede utilizar como una caja negra para probar su desempeño con diferente información; es decir, también predice las respuestas cuando se alimenta de información nueva. A esto se le conoce como evaluación del modelo, la cual se implementó con el 52 % de los datos (Cuadro 4 y Figura 7). Por otro lado, el modelo de balance de energía predice en forma aceptable la variación de la temperatura del aire dentro del invernadero.

Discusión

En relación con los resultados de la calibración del modelo, el valor de los parámetros (Cuadro 3) se comparó con resultados obtenidos por otros investigadores. El valor de la r_b encontrado es mayor que el típico sugerido por Bontsema et al. (2007) para un invernadero holandés con cultivo de tomate ($r_b = 200 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$), pero es similar al obtenido por Qiu et al. (2010) para tomate en un invernadero solar de China ($r_b = 295 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$).

El C_w depende de las dimensiones del invernadero y de la velocidad del viento, por lo que después de la calibración se obtuvo un valor ligeramente superior ($C_w = 0.2$) al encontrado por Ruiz-García et al. (2015) ($C_w = 0.16$) para un invernadero de polietileno con cultivo de tomate. Sin embargo, se encuentra dentro del rango de valores reportados por Molina-Aiz, Valera, Peña, Gil, y López (2009) (entre 0.16 y 0.82). Asimismo, el C_f fue mayor ($0.0125 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) al obtenido por Ruiz-García et al. (2015), lo que significa que el modelo sobreestima la tasa de infiltración.

Por otro lado, el α_c es superior ($10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) al reportado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2002) para invernaderos de plástico (entre 6 y $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) y de cristal ($8.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$). Mientras que el valor óptimo encontrado para el k_s ($1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) es igual al reportado por Valera et al. (2008) para suelo seco, y se encuentra dentro del intervalo de los valores obtenidos por Abu-Hamdeh y Reeder (2000) para suelo arenoso (entre 0.58

within the greenhouse environment (de Zwart, 1997). Likewise, the quality of the prediction for the air temperature inside the greenhouse can be improved by considering the balance of matter associated with air humidity. However, if a simple model is generated (with few state variables), it can easily be used in optimizing and controlling the greenhouse environment (Seginer, van Straten, & van Beveren, 2017a y 2017b; van Beveren et al., 2015a and 2015b).

Conclusions

An energy balance model was developed to predict the air temperature inside the greenhouse and the main parameters influencing the thermal behavior of the greenhouse were identified and calibrated. The results obtained after calibration substantially improved the model's performance. The fit measurements indicate a model with efficiencies of 89 and 86 % after calibration and in model evaluation, respectively.

Although the crop-specific transpiration parameter (k) is not very close to the values reported in the literature, the model, in general, has an adequate performance and can be used as a support tool to analyze the temperature behavior inside a greenhouse under different conditions in the central region of Mexico.

End of English version

References / Referencias

- Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1285-1290. doi: 10.2136/sssaj2000.6441285x
- Al-Jamal, K. (1994). Greenhouse cooling in hot countries. *Energy*, 19(11), 1187-1192. doi: 10.1016/0360-5442(94)90075-2
- Antón, A., Torrellas, M., Montero, J. I., Ruijs, M., Vermeulen, M., & Stanghellini, C. (2012). Environmental impact assessment of dutch tomato crop production in a venlo glasshouse. *Acta Horticulturae*, 927, 781-792. doi: 10.17660/ActaHortic.2012.927.97
- Arinze, E., Schoenau, G., & Besant, R. (1984). A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage. *American Society of Agricultural Engineers* 27(2), 508-519. doi: 10.13031/2013.32819
- Baeza, E., Montero, J. I., Pérez-Parra, J., Bailey, B. J., López, J. C., & Gázquez, J. C. (2014). Avances en el estudio de la ventilación natural. *Cajamar Caja Rural*,

y $1.94 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) y suelo franco arenoso (entre 0.19 y $1.12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$). Finalmente, el k fue menor al propuesto por van Beveren et al. (2015b), lo que implica que se requiere mayor investigación para determinar el papel que cumple este parámetro, al usar un valor cercano a los nominales (reportados en la literatura), sobre la calidad de la predicción del modelo.

La sub y sobreestimación de los parámetros se puede atribuir a que en la construcción, calibración y evaluación del modelo, el área de ventilación se consideró constante, ya que el invernadero estuvo abierto la mayor parte del tiempo, únicamente se cerraban las ventilas en tiempo de lluvia de las 7:00 pm a 8:00-8:30 am. Esto último no se consideró en el modelo, y su inclusión podría mejorar su desempeño. Además, el índice de área foliar se consideró constante, pero su inclusión como variable de entrada podría mejorar la estimación de la transpiración.

En cuanto al planteamiento del modelo como una sola ecuación de balance de energía para estimar la temperatura interna en el invernadero, se considera que se puede mejorar al incluir balances en estado no estacionario a nivel de la cubierta, en la planta y en el suelo, y utilizar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias y no solo una ecuación en el balance. Es decir, llevar a cabo balances en varias capas dentro del ambiente del invernadero (de Zwart, 1997). Asimismo, se puede mejorar la calidad de predicción de la temperatura del aire dentro del invernadero si se considera el balance de materia asociado con la humedad del aire. Sin embargo, si se genera un modelo simple (con pocas variables de estado), este se puede usar fácilmente en la optimización y control del ambiente del invernadero (Seginer, van Straten, & van Beveren, 2017a y 2017b; van Beveren et al., 2015a y 2015b).

Conclusiones

Se desarrolló un modelo de balance de energía para predecir la temperatura del aire dentro del invernadero y se identificaron los principales parámetros que influyen en el comportamiento térmico del invernadero, los cuales se calibraron. Los resultados obtenidos después de la calibración mejoraron de manera sustancial el desempeño del modelo. Las medidas de ajuste indican un modelo con eficiencias de 89 y 86 % después de la calibración y en la evaluación del modelo, respectivamente.

A pesar de que el parámetro de transpiración específica del cultivo (k) no está muy cercano a los valores reportados en la literatura, el modelo, en general, tiene

- Documentos técnicos no. 7.* Retrieved from www.publicacionescajamar.es
- Baille, A. (1999). Overview of greenhouse climate control in the Mediterranean regions. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 31, 59-76. Retrieved from <http://om.ciheam.org/om/pdf/c31/CI020831.pdf>
- Bakker, J., Bot, G., Challa, H., & Braak, N. V. (1995). *Greenhouse climate control: An integrated approach*. Netherlands: Wageningen Press. Retrieved from <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/301478> Castañeda
- Blasco, X., Martínez, J. M., Herrero, C., & Ramos, J. S. (2007). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55(1), 49-70. doi: 10.1016/j.compag.2006.12.001
- Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., de Visser, P., van Henten, E. J., Budding, J., & Nieboer, S. (2007). *Online monitoring van transpiratie en fotosynthese activiteit*. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw. Retrieved from https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/Eindrapport_12420.pdf
- Boulard, T., & Baille, A. (1987). Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector. *Energy in Agriculture*, 6(1), 17-26. doi: 10.1016/0167-5826(87)90018-0
- Castilla-Prados, N. (2007). *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Spain: Mundi-Prensa. Retrieved from <https://latam.casadellibro.com/libro-invernaderos-de-plastico-tecnologia-y-manejo-2-ed/9788484763215/1166011>
- de Zwart, H. F. (1997). A simulation model to estimate prospective of energy saving measures in horticulture. *Acta Horticulturae*, 443, 119-128. doi: 10.17660/actahortic.1997.443.15
- Grijalva-Contreras, R. L., Macías-Duarte, R., & Robles-Contreras, F. (2011). Behavior of beef tomato hybrids in greenhouse under desertic conditions in the northwest of Sonora. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 675-682. Retrieved from <http://www.revista.cbua.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/908/585>
- Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). La radiación solar en invernaderos mediterráneos. *Tecnología de producción*. Retrieved from <http://www.horticom.com/pd/imagenes/51/075/51075.pdf>
- Kindelan, M. (1980). Dynamic modeling of greenhouse environment. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 23(5), 1232-1239. doi: 10.13031/2013.34752
- Leal, I. J. (2008). Modeling of the climate for a greenhouse in the North-East of Mexico. *The International Federation of Automatic Control Seoul*, 6-11. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/6190/5abee4f1acfb0153300258a9cf97e6597d4a.pdf>
- López-Cruz, I. L., & Hernández-Larragoiti, L. L. (2010). Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia*, 44(7), 791-805. Retrieved from www.scielo.org.mx/pdf/agro/v44n7/v44n7a6.pdf
- Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Peña, A. A., Gil, J. A., & López, A. (2009). A study of natural ventilation in an Almería un desempeño adecuado y puede utilizarse como una herramienta de apoyo para analizar el comportamiento de la temperatura dentro de un invernadero bajo diferentes condiciones en la región central de México.

Fin de la versión en español

type greenhouse with insect screens by means of trisomic anemometry. *Biosystems Engineering*, 104(2), 224-242. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.013

Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). *Principles of environmental physics*. New York, USA: Fourth Edition. Elsevier.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO). (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Roma: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/005/S8630S/s8630s00.htm#Contents>

Qiu, R., Song, J., Du, T., Kang, S., Tong, L., Chen, R., & Wu, L. (2010) Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China. *Agricultural Water Management*, 130, 44-51. doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.013

Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzman, J. L., & Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and control of greenhouse crop growth*. Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-11134-6

Roy, J. C., Boulard, T., Kittas, C., & Wang, S. (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, 83(1), 1-20. doi: 10.1006/bioe.2002.0107

Ruiz-García, A., López-Cruz, I. L., Arteaga-Ramírez, R., & Ramírez-Arias, J. A. (2015). Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimadas mediante balance de energía. *Agrociencia*, 49(1), 87-100. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236850007>

Salazar-Moreno, R., López-Cruz, I. L., Rojano, A., Schmidt, U., & Dannehl, D. (2015). Tomato yield prediction in a semi-closed greenhouse. *Acta Horticulturae*, 1107, 263-269. doi: 10.17660/ActaHortic.2015.1107.36

Seginer, I., van Straten, G., & van Beveren, J. M. (2017a). Day-to-night heat storage in greenhouse: 1 optimisation for periodic weather. *Biosystems Engineering*, 161(1), 174-187. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.024

Seginer, I., van Straten, G., & van Beveren, J. M. (2017b). Day-to-night heat storage in greenhouses: 2 sub-optimal solution for realistic weather. *Biosystems Engineering*, 161(1), 188-199. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.023

Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*, 15(2), 134-154. doi: 10.1007/BF01347224

Speetjens, S. L., Stigter, G., & van Straten, G. (2010). Physics-based model for a water-saving greenhouse.

- Biosystems Engineering*, 105(2), 149-159. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.026
- Stanghellini, C., & Jong, T. (1995). A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76(2), 129-148. doi: 10.1016/0168-1923(95)02220-R
- Valera, R. D., Molina, D. F., & Álvarez, J. A. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. Madrid, España: Fondo Editorial del IDEA. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10995_Agr07_AyEE_en_invernaderos_A2008_9e4c63f5.pdf
- van Beveren, P., Bontsema, J., van Straten, G., & van Henten, E. (2015a). Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy*, 159, 509-519. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.012
- van Beveren, P., Bontsema, J., van Straten, G., & van Henten, E. (2015b). Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Applied Energy*, 137, 97-109. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.083
- van Henten, E., & Bontsema, J. (2009). Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Control Engineering Practice*, 17(1), 88-96. doi: 10.1016/j.conengprac.2008.05.008
- van Ooteghem, R. J. C. (2010). Optimal control design for a solar greenhouse. *IFAC Proceedings*, 43(26), 304-309. doi: 10.3182/20101206-3-JP-3009.00054
- Vanthoor, B. H. E., van Henten, E. J., Stanghellini, C., & de Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 3, sensitivity analysis of a combined greenhouse climate-crop yield model. *Biosystems Engineering*, 110(4), 396-412. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.08.006
- Walker, J. (1965). Predicting temperatures in ventilated greenhouses. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 8(3), 445-0448. doi: 10.13031/2013.40545
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2013). *Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment*. USA: Academic Press. doi: 10.1016/C2011-0-06987-9
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. USA: Academic Press. Retrieved from [http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/Statistical%20methods%20in%20the%20atmospheric%20sciences,%20D.%20Wilks%20\(2ed.,%20IGS%2091,%20Elsevier,%202006\)\(ISBN%200127519661\)\(649s\).pdf](http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/Statistical%20methods%20in%20the%20atmospheric%20sciences,%20D.%20Wilks%20(2ed.,%20IGS%2091,%20Elsevier,%202006)(ISBN%200127519661)(649s).pdf)