

SIMICROC: MODELO DE SIMULACIÓN DEL MICROCLIMA DE UN INVERNADERO

SIMICROC: GREENHOUSE MICROCLIMATE SIMULATION MODEL

Leyde Y. Briceño-Medina^{1*}, Manuel V. Ávila-Marroquín², Ramón E. Jaimez-Arellano¹

¹Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Laboratorio de Ecofisiología de Cultivos. Santa Rosa. Apartado 77. Mérida. 5101-A. Venezuela. (leydeb@ula.ve). ²Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. La Hechicera. Mérida. 5101-A. Venezuela.

RESUMEN

El manejo adecuado del microclima en los invernaderos es importante para incrementar la productividad. Por tanto, el objetivo de este estudio fue desarrollar y validar un modelo de simulación para analizar la respuesta del microclima del invernadero ante los cambios de las condiciones ambientales externas. El modelo combina un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden que caracterizan los balances de energía y humedad. El sistema de ecuaciones se resuelve numéricamente por el método predictor-corrector de Adams-Bashforth-Moulton usando un programa escrito en lenguaje Fortran 77. El modelo fue validado para un invernadero con cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*), ventilado naturalmente, ubicado en el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de la Universidad de Los Andes en Mérida, Venezuela. Los resultados obtenidos en la validación tienen un buen ajuste con los valores medidos experimentalmente, los coeficientes de correlación promedios fueron $R=0.88$ para la temperatura del aire interior, $R=0.87$ para la temperatura del cultivo, $R=0.97$ para la temperatura de la cubierta, $R=0.97$ para la temperatura del suelo y $R=0.79$ para la humedad relativa del aire interior. El modelo se puede usar para determinar los valores promedios de las variables en estudio para un invernadero naturalmente ventilado y predecir la reducción de la temperatura del aire interior, por medio del manejo de las ventanas.

Palabras clave: balance de energía y humedad, ventilación natural.

ABSTRACT

The proper management of microclimate in greenhouse conditions is important to increase productivity. Therefore, the objective of this study was to develop and validate a simulation model to analyze the response of the greenhouse microclimate to changes in external environmental conditions. The model combines a set of first order nonlinear differential equations characterizing the energy and moisture balances. The system of equations is solved numerically with the predictor-corrector method by Adams-Bashforth-Moulton using a program written in Fortran 77. The model was validated for a greenhouse tomato crop (*Solanum lycopersicum*), naturally ventilated, located in the Agricultural Research Institute, University of Los Andes, in Mérida, Venezuela. The validation results fit well with the values measured experimentally; the average correlation coefficients were $R=0.88$ for the indoor air temperature, $R=0.87$ for crop temperature, $R=0.97$ for cover temperature, $R=0.97$ for soil temperature and $R=0.79$ for indoor air relative humidity. The model can be used to determine the average values of the variables studied in a naturally ventilated greenhouse and predict the reduction of indoor air temperature through the use of windows.

Keywords: energy and moisture balance, natural ventilation.

INTRODUCTION

The microclimate of a greenhouse can be studied through experiment or simulation, and the latter method enables to characterize it more rapidly, at a lower cost and in a flexible and repeatable way (Wang and Boulard, 2000). The techniques for mathematical modeling of real processes are classified into two main categories: physical modeling and

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2011. Aprobado: agosto, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 801-813. 2011.

INTRODUCCIÓN

El microclima de un invernadero puede ser estudiado por experimentación o simulación, y con este último método se puede caracterizar más rápidamente, a un menor costo, y de manera flexible y repetible (Wang y Boulard, 2000). Las técnicas para el modelamiento matemático de procesos reales se clasifican en dos categorías principales: modelamiento físico y sistemas de identificación (Ljung, 1987). La primera categoría, basada en términos de leyes físicas, caracteriza el sistema mediante las ecuaciones de flujo de energía y masa; la segunda considera el problema de obtener modelos de sistemas dinámicos a partir de mediciones, y para ajustar los modelos paramétricos se usan técnicas lineales y no lineales tales como algoritmos de mínimos cuadrados recursivos y redes neuronales (Xu *et al.*, 2007). El modelaje térmico del microclima de un invernadero requiere un mínimo de cuatro ecuaciones no lineales que relacionen el intercambio de calor entre el aire interior, las plantas, el suelo, la cubierta, ante condiciones climáticas dadas y otros parámetros de diseño como volumen, forma, altura, orientación y lugar (Critten *et al.*, 2002; Sethi y Sharma, 2007).

Algunos métodos numéricos usados para la resolución del conjunto de ecuaciones que caracterizan el sistema del invernadero son: 1) para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias, el método de Gauss-Seidel (Singh *et al.*, 2006), el método predictor-corrector, (Abdel-Ghany y Kozai, 2005), el método de Euler (Yildiz y Stombaugh, 2006); y 2) para resolver ecuaciones diferenciales parciales, los métodos de elementos finitos o volúmenes finitos (Kittas y Bartzanas, 2007; Fidaros *et al.*, 2010).

Por tanto, el objetivo de este estudio fue aumentar la comprensión del sistema del invernadero para lo cual se desarrolló un programa que permite analizar la respuesta del microclima del invernadero ante los cambios de las condiciones ambientales externas integrando los modelos de Rodríguez (2002), Abdel-Ghany y Kozai (2005) y Singh *et al.* (2006). Además explorar alternativas de ventilación natural para el invernadero en estudio con la finalidad de usarlo en el control del microclima del invernadero y como una herramienta en la enseñanza para mejorar la comprensión de los procesos involucrados.

identification systems (Ljung, 1987). The first category, based on physical laws, characterizes the system using the energy and mass flow equations; the second considers the problem of obtaining dynamic system models from measurements and to adjust the parametric models, linear and nonlinear techniques are used, such as recursive least squares algorithms and neural networks (Xu *et al.*, 2007). The thermal modeling of a greenhouse microclimate requires a minimum of four nonlinear equations that relate the exchange of heat between the indoor air, the plants, soil, cover under certain weather conditions and other design parameters such as volume, shape, height, orientation and location (Critten *et al.*, 2002, Sethi and Sharma, 2007).

Some numerical methods used for solving the set of equations characterizing the greenhouse system are: 1) to solve ordinary differential equations, the Gauss-Seidel method (Singh *et al.*, 2006), the predictor-corrector method (Abdel Ghany and Kozai, 2005), the Euler method (Yildiz and Stombaugh, 2006); and 2) to solve partial differential equations, the finite element or finite volume methods (Kittas and Bartzanas, 2007; Fidaros *et al.*, 2010).

Therefore, the objective of this study was to enhance understanding of the greenhouse system for which a program was developed to analyze the response of the greenhouse microclimate to changes in external environmental conditions, integrating the models by Rodríguez (2002), Abdel-Ghany and Kozai (2005) and Singh *et al.* (2006). Also to explore alternatives of natural ventilation for the greenhouse under study with the purpose of using it in controlling the greenhouse microclimate, and as a tool in teaching to enhance understanding of the processes involved.

MATERIALS AND METHODS

Description of experimental site, cultivation, and measurements

Input variables were obtained from a greenhouse located in the Agricultural Research Institute, Universidad de Los Andes in Mérida, Venezuela (8 ° 37 '37"N and 71 ° 11' W, 1926 m altitude). The greenhouse has 162 m², the roof arch is symmetrical and the system of opening and closing of windows is automated. The side windows are of anti-aphid mesh with a tube, and can be wrapped to the desired height. Along the ridge there

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio experimental, cultivo y mediciones

Las variables de entrada se obtuvieron de un invernadero ubicado en el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, de la Universidad de Los Andes en Mérida, Venezuela ($8^{\circ} 37' 37''$ N y $71^{\circ} 11'$ O; altitud 1926 m). El invernadero tiene 162 m², el techo es de arco simétrico y el sistema de apertura y cierre de las ventanas es automatizado. Las ventanas laterales son de malla antiáfido y van con un tubo, las cuales pueden envolverse a la altura deseada; a lo largo de la cumbre hay una ventana cenital que abre por desplazamiento vertical hasta 0.5 m. El material de la cubierta es polietileno de baja densidad (espesor 150 μ m) en su primer año de cultivo para el periodo de estudio. La superficie del suelo está cubierta parcialmente por el cultivo y el resto por dos capas superpuestas: plástico negro y Ground Cover blanco. En el momento de las mediciones se cultivaban 232 plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) (periodo de cultivo del 15/07/2006 al 07/01/2007).

Para medir las variables de radiación fotosintéticamente activa (μ moles m⁻² s⁻¹), temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad (m s⁻¹) y dirección del viento, se usaron sensores HOBO S-LIA-M003, S-TMA-M006, S-WCA-M003, conectados a dos estaciones registradoras HOBO H21-001 y H21-002, colocadas en el interior y el exterior del invernadero (Figura 1). Los registros se realizaron simultáneamente cada 10 min del 11/11/2006 al 21/11/2006. Las mediciones de la temperatura del subsuelo se realizaron el 14/12/2006, a 5 cm de profundidad en tres puntos diferentes del invernadero, usando un termómetro marca QUALITY QTD-160.

Descripción del modelo matemático

El modelo propuesto integra los modelos de Rodríguez (2002), Abdel-Ghany y Kozai (2005) y Singh *et al.* (2006). Comprende un conjunto de cinco ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden no lineales usadas para determinar los balances de energía y masa del sistema, bajo la influencia de las condiciones climáticas externas y atendiendo a los efectos de la orientación, localización, forma, tamaño del invernadero, así como las propiedades físicas de la cubierta, aire interior, cultivo y suelo.

Las ecuaciones son las siguientes:

1) Balance de energía en la cubierta:

is an overhead window that opens by vertical displacement up to 0.5 m. The cover material is low density polyethylene (150 μ m thick) in its first crop year for the period of study. The soil surface is partially covered by the crop and the rest by two layers: black plastic and white Ground Cover. At the time of measurements 232 tomato plants were grown (*Solanum lycopersicum*) (period of cultivation from 15/07/2006 to 07/01/2007).

To measure the variables of photosynthetically active radiation (μ moles m⁻² s⁻¹), temperature (°C), relative humidity (%), speed (m s⁻¹) and wind direction, HOBO S-LIA-M003, S-TMA-M006, S-WCA-M003 sensors were used connected to two recording stations HOBO H21-001 and H21-002, placed inside and outside the greenhouse (Figure 1). The recordings were made simultaneously every 10 min from 11/11/2006 to 21/11/2006. Measurements of subsoil temperature were performed on 14/12/2006 at 5 cm depth at three different points in the greenhouse, using a QUALITY QTD-160 thermometer.

Description of the mathematical mode

The proposed model integrates the models by Rodríguez (2002), Abdel-Ghany and Kozai (2005) and Singh *et al.* (2006). It comprises a set of five ordinary differential nonlinear first order equations used to determine the energy and mass balances of the system under the influence of outside weather conditions, considering the effects of orientation, location, shape, size of the greenhouse, as well as the physical properties of the cover, indoor air, crop and soil.

The equations are:

1) Energy balance in the cover:

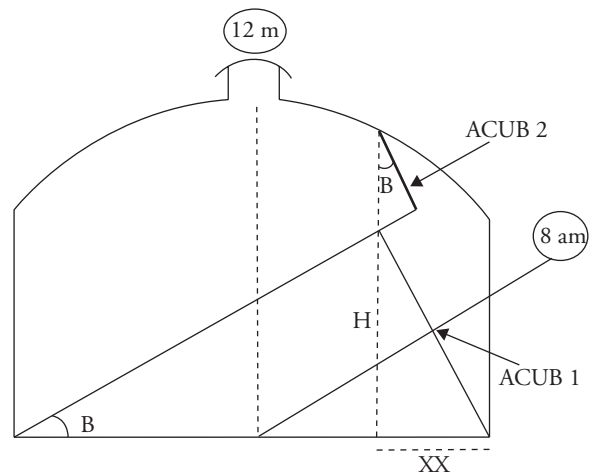


Figura 1. Ubicación de los sensores para el registro de datos.
Figure 1. Location of sensors for data registration.

$$Q_{RSOLAR} + Q_{RTERMICA} - Q_{CONVINTERIOR} - Q_{CONVEXTERIOR} =$$

$$ESCUB * CPCUB * \frac{dVW}{dt} \quad (1)$$

$$(IG * ALCUB * ACUB1 / ASUET + IG * ALCUB * (1.0 + TACUB) * ACUB2 / ASUET + SIGM * ALCUB * T * (EPSUE * FFCBSUE * (VZ + 273.0) ** 4 + EPCIE * (TCIE + 273.0) ** 4 + EPCUL * FFCBCUL * (VX + 273.0) ** 4) - 2.0 * SIGM * EPCUB * (VW + 273.0) ** 4 - HCINT * (VW - VY) - HCEXT * (VW - TEXT)) =$$

$$(ESCUB * CPCUB) * \frac{dVW}{dt} \quad (2)$$

2) Balance de energía en el cultivo:

$$Q_{RSOLAR} + Q_{RTERMICA} - Q_{SENSIBLE} - Q_{LATENTE} =$$

$$ESHOJ * CPCUL * \frac{dVX}{dt} \quad (3)$$

$$(IAF * HCCUL * (VY - VX) + ALCUL * TACUB * IG + SIGM * ALCUL * T * (EPCUB * (VW + 273.0) ** 4 + EPSUE * (VZ + 273) ** 4) - SIGM * EPCUL * (VX + 273.0) ** 4 - FFSUECUL * LMDTI * TRACUL) * FFCBSUE = (ESHOJ * CPCUL) * \frac{dVX}{dt} \quad (4)$$

3) Balance de energía en el aire interior:

$$Q_{CONVCUBINT} + Q_{CONVCULTINT} + Q_{CONVSUEINT} + Q_{LATENTE} +$$

$$Q_{VENTIL} = \frac{CPAIR * V}{ASUET} * \frac{dVY}{dt} \quad (5)$$

$$(HCINT * (VW - VY) + (VX - VY) * HCCUL * IAF * FFSUECUL + (VX - VY) * HCCUL * IAF * FFCBCUL + HCSUE * (VZ - VY) + FFSUECUL * TRACUL * LMDTI + CPAIR * VDOT * (TEXT - VY)) = (CPAIR * V / ASUET) * \frac{dVY}{dt} \quad (6)$$

4) Balance de energía en el suelo desnudo:

$$Q_{RSOLAR} + Q_{RTERMICA} - Q_{CONVSUEINT} - Q_{COND} =$$

$$CPSUE * ZP * \frac{dVZ}{dt} \quad (7)$$

$$(ALSUE * TACUB * IGH + SIGM * ALSUE * (EPCIE * TACUB * (TCIE + 273.0) ** 4 + EPCUB * (VW + 273.0) ** 4) - SIGM * EPSUE * (VZ + 273.0) ** 4 - HCSUE * (VZ - VY) - KK *$$

$$Q_{RSOLAR} + Q_{RTERMICA} - Q_{CONVINTERIOR} - Q_{CONVEXTERIOR} =$$

$$ESCUB * CPCUB * \frac{dVW}{dt} \quad (1)$$

$$(IG * ALCUB * ACUB1 / ASUET + IG * ALCUB * (1.0 + TACUB) * ACUB2 / ASUET + SIGM * ALCUB * T * (EPSUE * FFCBSUE * (VZ + 273.0) ** 4 + EPCIE * (TCIE + 273.0) ** 4 + EPCUL * FFCBCUL * (VX + 273.0) ** 4) - 2.0 * SIGM * EPCUB * (VW + 273.0) ** 4 - HCINT * (VW - VY) - HCEXT * (VW - TEXT)) =$$

$$(ESCUB * CPCUB) * \frac{dVW}{dt} \quad (2)$$

2) Energy balance in the crop:

$$Q_{RSOLAR} + Q_{RTERMICA} - Q_{SENSIBLE} - Q_{LATENTE} =$$

$$ESHOJ * CPCUL * \frac{dVX}{dt} \quad (3)$$

$$(IAF * HCCUL * (VY - VX) + ALCUL * TACUB * IG + SIGM * ALCUL * T * (EPCUB * (VW + 273.0) ** 4 + EPSUE * (VZ + 273) ** 4) - SIGM * EPCUL * (VX + 273.0) ** 4 - FFSUECUL * LMDTI * TRACUL) * FFCBSUE = (ESHOJ * CPCUL) * \frac{dVX}{dt} \quad (4)$$

3) Energy balance in indoor air:

$$Q_{CONVCUBINT} + Q_{CONVCULTINT} + Q_{CONVSUEINT} + Q_{LATENTE} +$$

$$Q_{VENTIL} = \frac{CPAIR * V}{ASUET} * \frac{dVY}{dt} \quad (5)$$

$$(HCINT * (VW - VY) + (VX - VY) * HCCUL * IAF * FFSUECUL + (VX - VY) * HCCUL * IAF * FFCBCUL + HCSUE * (VZ - VY) + FFSUECUL * TRACUL * LMDTI + CPAIR * VDOT * (TEXT - VY)) = (CPAIR * V / ASUET) * \frac{dVY}{dt} \quad (6)$$

4) Balance of energy in the bare ground:

$$Q_{RSOLAR} + Q_{RTERMICA} - Q_{CONVSUEINT} - Q_{COND} =$$

$$CPSUE * ZP * \frac{dVZ}{dt} \quad (7)$$

$$(ALSUE * TACUB * IGH + SIGM * ALSUE * (EPCIE * TACUB * (TCIE + 273.0) ** 4 + EPCUB * (VW + 273.0) ** 4) - SIGM * EPSUE * (VZ + 273.0) ** 4 - HCSUE * (VZ - VY) - KK *$$

$$(VZ-TSUBS)/ZP)=(CPSUE*ZP)*\frac{dVZ}{dt} \quad (8)$$

5) Balance de humedad en el aire interior del invernadero:

$$VENT+EVAP_{\text{cantero}}+TRACUL=\frac{DAIR * V}{ASUET} * \frac{dVV}{dt} \quad (9)$$

$$(VDOT*DAIR*(HEXT-VV)/ASUET+HCSUE/CPAIR* (IHUM*HSSUE-VV)+TRACUL)=$$

$$(DAIR*V/ASUET)*\frac{dVV}{dt} \quad (10)$$

La radiación efectiva incidente sobre la cubierta (Figura 2) se calculó usando el procedimiento de Singh *et al.* (2006):

$$B=ASIN(COS(LAT*(PI/180))*COS(15.0*(T-12.0)* (PI/180))*COS(23.45*(PI/180)*SIN((2.0*PI)*(DIAS-81)/365))+SIN(LAT*(PI/180)*SIN(23.45*(PI/180)*SIN((2.0*PI)*(DIAS-81)/365))) \quad (11)$$

$$ALT1=ANCHO*SIN(B) \quad (12)$$

$$C= COS(B)*SIN(THETA)*COS(ZZ-PHI)+SIN(B)*COS(THETA) \quad (13)$$

$$ACUB1=ALT1*LG*C \quad (14)$$

$$ALT2=(H-(ANCHO-XX)*TAN(B)) \quad (15)$$

$$ACUB2=ALT2*COS(B)*LG*C \quad (16)$$

El flujo de aire debido a la ventilación natural se expresa como función de la diferencia del coeficiente de presión (Kittas *et al.*, 1997) y se determinó para tres casos (Cuadro 1): Caso 1: ventanas laterales abiertas y cenital cerrada; Caso 2: ventanas laterales abiertas y cenital abierta; Caso 3: ventanas laterales cerradas y cenital cerrada.

La transpiración del cultivo se determinó con las ecuaciones propuestas por Rodríguez (2002):

$$RA=(LOG((Z-D)/(ALTCUL-D)))*LOG((Z-D)/ZO))/(0.1681*VI) \quad (30)$$

$$RS=200.0*(1.0+1.0/EXP(0.05*(qRSOL-50.0))) \quad (31)$$

$$RTRAN=1.0/(2.0*IAF)*((1.0+PCSAIR/GAMM)*RA+RS) \quad (32)$$

$$(VZ-TSUBS)/ZP)=(CPSUE*ZP)*\frac{dVZ}{dt} \quad (8)$$

5) Balance of moisture in the air inside the greenhouse:

$$VENT+EVAP_{\text{cantero}}+TRACUL=\frac{DAIR * V}{ASUET} * \frac{dVV}{dt} \quad (9)$$

$$(VDOT*DAIR*(HEXT-VV)/ASUET+HCSUE/CPAIR* (IHUM*HSSUE-VV)+TRACUL)=$$

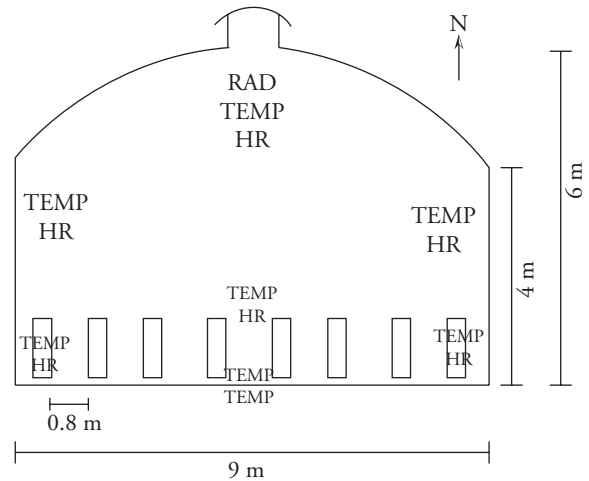
$$(DAIR*V/ASUET)*\frac{dVV}{dt} \quad (10)$$

The effective incident radiation on the cover (Figure 2) was calculated using the method of Singh *et al.* (2006):

$$B=ASIN(COS(LAT*(PI/180))*COS(15.0*(T-12.0)* (PI/180))*COS(23.45*(PI/180)*SIN((2.0*PI)*(DIAS-81)/365))+SIN(LAT*(PI/180)*SIN(23.45*(PI/180)*SIN((2.0*PI)*(DIAS-81)/365))) \quad (11)$$

$$ALT1=ANCHO*SIN(B) \quad (12)$$

$$C= COS(B)*SIN(THETA)*COS(ZZ-PHI)+SIN(B)*COS(THETA) \quad (13)$$



HR: humedad relativa
TEMP: temperatura
RAD: radiación

Figura 2. Esquema para calcular el área de incidencia efectiva de la radiación solar sobre la cubierta (ACUB1 y ACUB2), en función del horario y las coordenadas celestes; referencia horaria 08:00 h.

Figure 2. Scheme to calculate the area of actual incidence of solar radiation on the cover (ACUB1 and ACUB2), based on time and ephemeris; reference time 08:00 h.

Cuadro 1. Ecuaciones empleadas para determinar el flujo de ventilación.
Table 1. Equations used to determine the flow of ventilation

Caso 1		Caso 2		Caso 3	
ALTM=ALTV-APIZQ	(17)	ALTM=ALTV-APIZQ		AMLL=LG*ALTM*PORO	
AMLL=LG*ALTM* PORO	(18)	AMLL=LG*ALTM* PORO		AENT=AVEN*PORO	(28)
AENT=AIZQ	(19)	AENT=AIZQ		ASAL=AVEN*PORO	(29)
ASAL=ADER	(20)	ASAL=ADER+ACEN	(26)	DCPE=(CPEIZQ-CPEDER)	
DCPE=(CPEIZQ-CPEDER)	(21)	DCPE=(CPEIZQ-		VDOT=AMLL*CD2*	
VDOT1=AENT*CD1*	(22)	(CPEDER+CPECEN)/2)	(27)	VE*SQRT(DCPE)*	
VE*SQRT(DCPE)		VDOT1=AENT*CD1*VE*		PORO*(2.0-PORO)	
VDOT2=AMLL*CD2*	(23)	SQRT(DCPE)		NR=VDOT/V*3600	
VE*SQRT(DCPE)*		VDOT2=AMLL*CD2*		VI=VDOT/AENT	
PORO*(2.0-PORO)		VE*SQRT(DCPE)*PORO*			
VDOT=VDOT1+VDOT2	(24)	(2.0-PORO)			
NR=VDOT/V*3600	(25)	VDOT=VDOT1+VDOT2			
VI=VDOT/(AENT+ AMLL)	(25)	NR=VDOT/V*3600			
		VI=VDOT/(AENT+AMLL)			

$$\text{TRACUL}=1.0/\text{RTRAN}*(\text{DAIR}*\text{HSINT}+(\text{PCSAIR}/\text{GAMM})*(\text{RS}/(2.0*\text{IAF}))*(\text{qn}/\text{LMDTI})-\text{DAIR}*V\text{V})$$

(33)

$$\text{ACUB1}=\text{ALT1}*\text{LG}*C \quad (14)$$

$$\text{ALT2}=(\text{H}-(\text{ANCHO}-\text{XX})*\text{TAN}(\text{B})) \quad (15)$$

El área de la cubierta y el volumen de un invernadero con techo curvo simétrico se calcularon con las ecuaciones:

$$\text{ACUB2}=\text{ALT2}*\text{COS}(\text{B})*\text{LG}*C \quad (16)$$

$$\text{ANG}=\text{DATAN}(\text{ANCHO}/\text{ALT1}*0.5)*2.0 \quad (34)$$

$$\text{ATECHO}=\text{ALT1}*\text{ANG}*LG \quad (35)$$

$$\text{ALAT}=\text{ALT1}*LG*2.0 \quad (36)$$

$$\text{ACUB}=\text{ATECHO}+\text{ALAT} \quad (37)$$

$$V=(\text{ANCHO}*\text{ALT1}+\text{ANG}*\text{ALT1}^2)*LG \quad (38)$$

Simulación numérica

La integración numérica de este sistema de ecuaciones se resuelve por el método multipaso de Adams-Bashforth-Moulton (Burden y Faires, 2004). Los valores de arranque se obtienen por el método Runge-Kutta de cuarto orden (Chapra y Canale, 2004). Para la solución de estas ecuaciones se desarrolló un programa escrito en Fortran 77, usando el compilador Fortran G77 de GNU para MSDOS.

Proceso de calibración

Del conjunto de datos registrados, para la calibración se usaron los valores de las mediciones internas y externas del día 12 al 15/11/2006. Los parámetros CPAIR, KK, FFSUECUL se esco-

The flow of air due to natural ventilation is expressed as a function of the difference in pressure coefficient (Kittas *et al.*, 1997) and was determined for three cases (Table 1): Case 1: side windows open and overhead window closed; Case 2: side windows open and overhead open, Case 3: side windows closed and overhead closed.

Crop transpiration was determined by using the equations proposed by Rodríguez (2002):

$$\text{RA}=(\text{LOG}((\text{Z}-\text{D})/(\text{ALT}-\text{D}))*\text{LOG}((\text{Z}-\text{D})/\text{ZO}))/((0.1681*V\text{I})) \quad (30)$$

$$\text{RS}=200.0*(1.0+1.0/\text{EXP}(0.05*(\text{qRSOL}-50.0))) \quad (31)$$

$$\text{RTRAN}=1.0/(2.0*\text{IAF})*((1.0+\text{PCSAIR}/\text{GAMM})*\text{RA}+\text{RS}) \quad (32)$$

$$\text{TRACUL}=1.0/\text{RTRAN}*(\text{DAIR}*\text{HSINT}+(\text{PCSAIR}/\text{GAMM})*(\text{RS}/(2.0*\text{IAF}))*(\text{qn}/\text{LMDTI})-\text{DAIR}*V\text{V}) \quad (33)$$

The cover area and volume of a symmetrical curved roof greenhouse were calculated using the equations:

$$\text{ANG}=\text{DATAN}(\text{ANCHO}/\text{ALT1}*0.5)*2.0 \quad (34)$$

gieron por ser inciertos y porque produjeron el mayor impacto en las variables predichas. La calibración se realizó cambiando los valores de los parámetros indicados de forma manual, hasta obtener un mejor ajuste entre lo predicho y lo medido.

Proceso de validación

Se usaron los datos registrados del día 16 al 19/11/2006 para validar el modelo. Se calculó el coeficiente de correlación (R), el coeficiente de determinación (R²), el error medio

$$\left(EM = \left| \sum_{i=1}^n (y - x) / N \right| \right) \text{ y la raíz del error cuadrático medio}$$

$$\left(RECM = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y - x)^2 / N} \right).$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables predichas por el modelo y medidas en el invernadero en estudio del día 16 al 19/11/2006, después de la calibración, se muestran en las Figuras 3, 4, 5, 6 y 7. Para calcular el flujo de ventilación se seleccionaron las ventanas laterales abiertas y la cénital cerrada, con igual apertura para todos los días simulados. Las superficies de la cubierta, el suelo y el cultivo considerado como una gran hoja, así como el volumen del aire en el interior del invernadero se suponen homogéneos y sus propiedades constantes en el tiempo.

Para todos los días durante la noche la temperatura predicha del aire interior (Figura 3) y del cultivo (Figura 4) fue mayor que la medida, pero la humedad relativa del aire predicha fue menor (Figura 5). La diferencia observada entre la temperatura del cultivo medida y predicha, puede atribuirse a una sobreestimación del valor del área foliar, debido a que la ecuación usada para calcular el área foliar (Blanco y Folegatti, 2003) se desarrolló con datos experimentales para condiciones diferentes a la de este estudio.

Las diferencias entre la temperatura de la cubierta medida y predicha (Figura 6) se atribuyen a que se usaron valores constantes de los factores de forma (relaciones entre áreas) para calcular el intercambio de radiación térmica entre la cubierta, cultivo y suelo, por lo que debe usarse un método más eficiente para esos cálculos. La temperatura del suelo medida y predicha se muestra en la Figura 7.

$$ATECHO = ALTT * ANG * LG \quad (35)$$

$$ALAT = ALTL * LG * 2.0 \quad (36)$$

$$ACUB = ATECHO + ALAT \quad (37)$$

$$V = (ANCHO * ALTL + ANG * ALTT * 2) * LG \quad (38)$$

Numerical simulation

The numerical integration of this system of equations was solved by the multistep method by Adams-Bashforth-Moulton (Burden and Faires, 2004). Bootstrap values were obtained by the fourth order Runge-Kutta method (Chapra and Canale, 2004). To solve these equations we developed a program written in Fortran 77 using the GNU G77 Fortran compiler for MSDOS.

Calibration process

Of all the data recorded, we used the values of the internal and external measurements from 12 to 15/11/2006 for calibration. The CPAIR, KK, FFSUECUL parameters were chosen for being uncertain and because they produced the greatest impact on the predicted variables. We performed calibration by changing the values of the parameters specified manually, until obtaining a better fit between the predicted and measured.

Validation process

We used the data recorded on 16 to 19/11/2006 to validate the model. We calculated the correlation coefficient (R), the coefficient of determination (R²), the mean error

$$\left(EM = \left| \sum_{i=1}^n (y - x) / N \right| \right) \text{ and the root mean square error}$$

$$\left(RECM = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y - x)^2 / N} \right).$$

RESULTS AND DISCUSSION

The variables predicted by the model and measured in the greenhouse from 16 to 19/11/2006, after calibration, are shown in Figures 3, 4, 5, 6 and 7. To calculate the flow of ventilation, open side windows and the overhead closed were selected, with the same openness during all the days of simulation. The surfaces of the cover, soil, and crop regarded as a large leaf, as well as the amount of air inside the

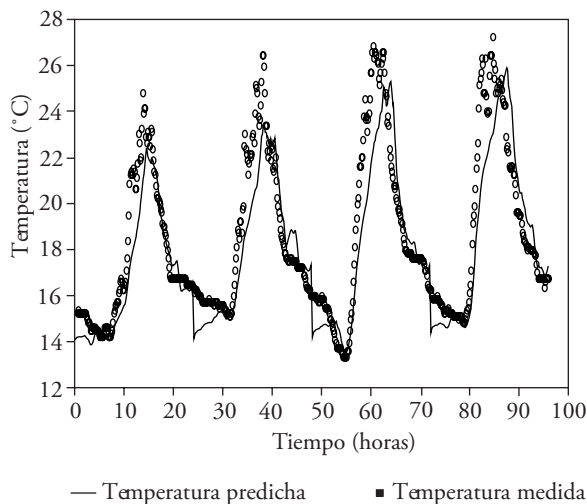


Figura 3. Perfil de la temperatura del interior medida *vs* temperatura predicha para la validación.
Figure 3. Profile of inside temperature measured *vs* temperature predicted for validation.

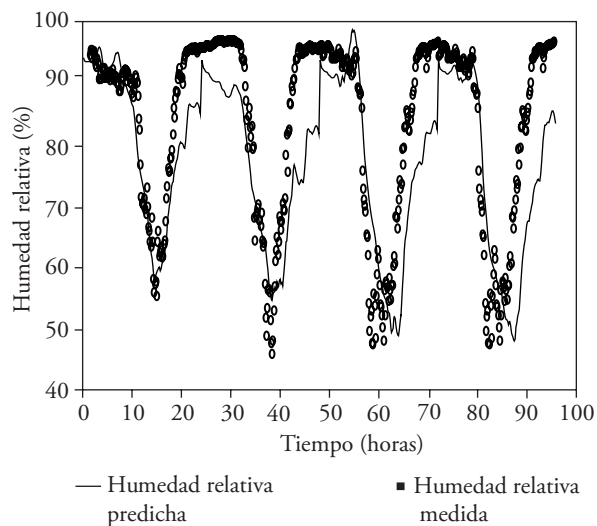


Figura 5. Perfil de la humedad relativa medida *vs* humedad relativa predicha para la validación.
Figure 5. Profile of relative humidity measured *vs* predicted relative humidity for validation.

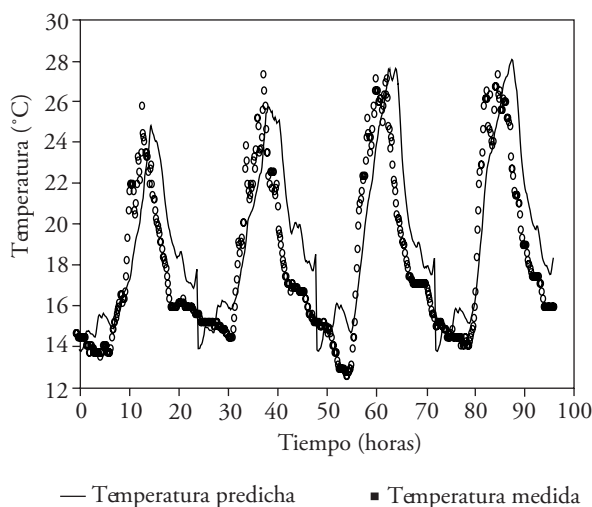


Figura 4. Perfil de la temperatura del cultivo medida *vs* temperatura predicha para la validación.
Figure 4. Profile of crop temperature measured *vs* temperature predicted for validation.

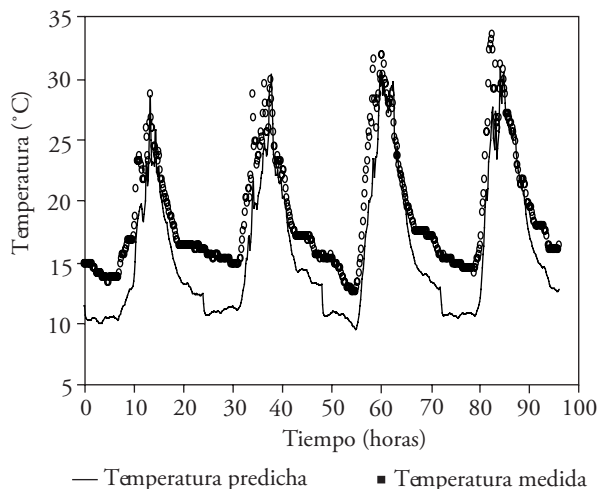


Figura 6. Perfil de la temperatura de la cubierta medida *vs* temperatura predicha para la validación.
Figure 6. Profile of cover temperature measured *vs* temperature predicted for validation.

En el Cuadro 2 se muestran los datos estadísticos de las variables predichas después de la calibración y para la validación del día 16 al 19/11/2006. Las variables que tienen un mejor ajuste entre los valores medidos y los predichos son la temperatura del suelo, la temperatura de la cubierta y la temperatura de aire interior, seguidos de la temperatura del cultivo y la

greenhouse are assumed as homogeneous and with constant properties over time.

During the night of every day the predicted indoor air (Figure 3) and crop temperatures (Figure 4) were higher than those measured, but the predicted air relative humidity was lower (Figure 5). The difference between the crop temperature measured and the one

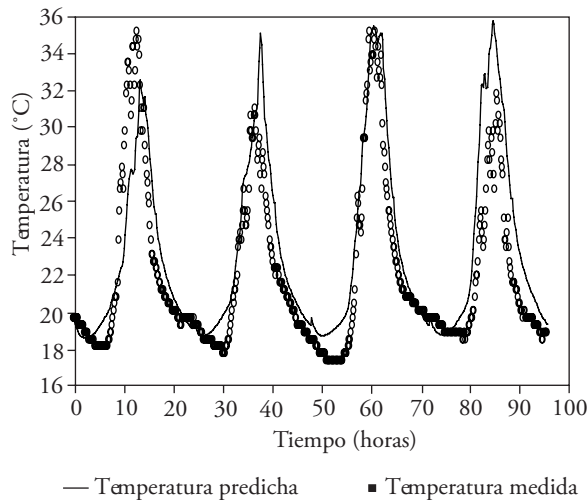


Figura 7. Perfil de la temperatura del suelo medida *vs* temperatura predicha para la validación.

Figure 7. Profile of soil temperature measured *vs* temperature predicted for validation.

humedad relativa del aire interior. Estos resultados son similares a los obtenidos por Guzmán-Cruz *et al.* (2010) para la temperatura del aire interior ($R=0.79$) y la humedad relativa del aire interior ($R=0.68$); además, para un día simulado Castañeda *et al.* (2007) muestran los siguientes valores de temperatura: aire interior ($R^2=0.86$), cultivo ($R^2=0.82$), cubierta ($R^2=0.81$), suelo ($R^2=0.68$) y humedad relativa del aire interior ($R^2=0.95$).

El modelo no es válido en ausencia de viento debido a la influencia del cálculo del flujo de ventilación sobre la transpiración del cultivo y el flujo de calor latente en el aire interior y el cultivo. Adicionalmente, el modelo usa parámetros tomados de la literatura, los cuales deben ser optimizados.

predicted can be attributed to an overestimation of the leaf area value, because the equation used to calculate the leaf area (Blanco and Folegatti, 2003) was developed with experimental data for conditions other than those considered in this study.

The differences between the measured and predicted temperatures of the cover (Figure 6) are attributed to the use of constant values of shape factors (relationships between areas) to calculate the thermal radiation exchange between the cover, crop and soil; therefore a more efficient method should be used for these calculations. Measured and predicted soil temperatures are shown in Figure 7.

Table 2 shows the statistics of the variables predicted after calibration and for validation from 16 to 19/11/2006. The variables having a better fit between measured and predicted values are soil temperature, cover temperature and indoor air temperature, followed by crop temperature and the relative humidity of indoor air. These results are similar to those obtained by Guzmán-Cruz *et al.* (2010) for inside air temperature ($R=0.79$) and inside air relative humidity ($R=0.68$); in addition, in a simulation day Castañeda *et al.* (2007) show the following temperature values: inside air ($R^2=0.86$), crop ($R^2=0.82$), cover ($R^2=0.81$), soil ($R^2=0.68$), and relative humidity of inside air ($R^2=0.95$).

The model is not valid in the absence of wind due to the influence of the ventilation flow calculation on crop transpiration and latent heat flux on the indoor air and crop. Additionally, the model uses parameters taken from the literature, which must be optimized.

The program was structured in modules, which facilitates the modification of the model and calibration for other conditions and structures, as well as the possibility of adding other modules to improve the model quality. This program can be used

Cuadro 2. Estadísticos de R , R^2 , EM, RECM para las variables predichas en la validación del día 16 al 19/11/2006.

Table 2. Statistical data of R , R^2 , EM, RMSE for the variables predicted in the validation from 16 to 19/11/2006.

	Temperatura del aire	Temperatura del cultivo	Temperatura de la cubierta	Temperatura del suelo	Humedad relativa del aire
$y=y_0+(a)(x)$	$y_0=3.551$ $a=0.7907$	$y_0=3.668$ $a=0.8535$	$y_0=-5.703$ $a=1.137$	$y_0=-0.3855$ $a=1.073$	$y_0=2.162$ $a=0.8727$
R^2	0.77	0.75	0.95	0.95	0.63
R	0.88	0.87	0.97	0.97	0.79
EM	0.23	0.99	3.10	1.24	8.84
RECM	4.22	4.39	3.99	4.84	8.81

El programa fue estructurado en módulos, lo que facilita la modificación del modelo y la calibración para otras condiciones y estructuras diferentes, así como la posibilidad de incorporar otros módulos para mejorar la capacidad del modelo. Este programa puede usarse para predecir la reducción de la temperatura del aire interior debido a la ventilación natural, mediante el manejo de las ventanas, y permite determinar si la disminución de la temperatura cumple o no con lo requerido, lo que conllevaría a la implementación de las medidas pertinentes.

CONCLUSIONES

El modelo presentado en este estudio se puede usar para determinar los valores promedios de temperatura para la superficie de la cubierta, el cultivo y el suelo, y además la temperatura y la humedad relativa del volumen de aire para un invernadero naturalmente ventilado, a partir de las condiciones ambientales externas.

Los resultados obtenidos en la validación tienen un buen ajuste con los valores medidos experimentalmente, pero la capacidad del modelo se puede mejorar incorporando módulos relacionados con el crecimiento del cultivo y el desarrollo del área foliar.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue parte del proyecto CVI-PIC-IND-FO-01-05 financiado por el CDCHT de la Universidad de Los Andes. Cofinanciado por Fundacite Mérida y la Compañía PAPELEX. Especial agradecimiento al Ing. José María Zamora del CITEC – CPTM de la Universidad de Los Andes, por la revisión del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Ghany, A., and T. Kozai. 2005. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renewable Energy* 31: 1521-1538.
- Blanco, F., and F. Folegatti. 2003. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Hort. Bras.* 21: 666-669.
- Burden R., and J. Faires. 2004. *Análisis Numérico*. Internacional Thomson Editores, S.A, México. pp: 289-301.
- Castañeda-Miranda, R., E. Ventura R., R. Peniche V., y G. Herrera R. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41: 317-335.
- Chapra, S., y R. Canale. 2004. *Metódos Numéricos para Ingenieros*. 4a. ed. McGraw-Hill Interamericana, México. pp: 734-745.
- Critten, D., and B. Bailey. 2002. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agric. For. Meteorol.* 112: 1-22.
- Fidaros, D., C. Baxevanou, T. Bartzanas, and C. Kittas. 2010. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy* 35: 1380-1386.
- Guzmán-Cruz, R., R. Castañeda-Miranda, J. García-Escalante, A. Herrera-Lara, I. Serroukh, y L. Solis-Sanchez. 2010. Algoritmos genéticos para La calibración del modelo climático de un invernadero. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 16: 23-30.
- Kittas, C., T. Boulard, and G. Papadakis. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and size openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Trans. ASABE* 40: 415-425.
- Kittas, C., and T. Bartzanas. 2007. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environ.* 42: 3774-3784.
- Ljung, L. 1987. *System Identification -Theory for the User*. Prentice-Hall. New Jersey. 511 p.
- Rodríguez, D. F. 2002. *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*. Tesis Doctoral Universidad de Almería, España. 390 p.
- Sethi, V., and S. Sharma. 2007. Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system. *Solar Energy* 81: 723-741.
- Singh, G., Parm Singh, Prit Singh, and K. Singh. 2006. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy* 31: 1541-1560.
- Wang, S., and T. Boulard. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a Mediterranean climate. *J. Agric. Eng. Res.* 75: 27-38.

CONCLUSIONS

The model presented in this study can be used to determine the surface temperature average values of the cover, crop and soil, and also the temperature and relative humidity of the air volume for a naturally ventilated greenhouse based on external environmental conditions.

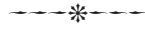
The validation results fit well with the values measured experimentally, but the model can be improved by incorporating modules related to crop growth and the development of leaf area.

—End of the English version—

—*—

Xu, F., Lan-lan Yu, Jiao-liao Chen, and Hai-hong Wu. 2007. The actuality and research Situation on the modeling methods of the greenhouse microclimate. *J. Agric. Mechanization Res.* 11: 44-47.

Yildiz, I., and D. P. Stombaugh. 2006. Dynamic modeling of microclimate and environmental control strategies in a greenhouse coupled with a heat pump system. *Acta Horticulturae* 718: 331-340.



Nomenclatura

Área de la cubierta (ACUB), cultivo (ACULT), suelo total (ASUET), entrada (AENT), salida (ASAL), malla (AMLL) (m²).

Absortividad solar de la cubierta (ALCUB), cultivo (ALCUL), suelo (ALSUE).

Absortividad a las radiaciones térmicas de la cubierta (ALCUBT), cultivo (ALCULT).

Altura del cultivo (ALTCUL), lateral del invernadero (ALTTL), total del invernadero (ALTT), de malla no enrollada (ALTM), plano de desplazamiento cero (D), de toma de mediciones (Z) (m).

ANCHO: ancho del invernadero (m).

Ángulo correspondiente a la altura solar (B), de inclinación (THETA), de orientación azimutal (PHI), azimut respecto al Sur (ZZ).

Coefficiente de descarga sin malla (CD1), con malla (CD2).

CPAIR: calor específico del aire interior (J kg⁻¹ °C⁻¹).

Capacidad calorífica del aire (CPAIR), cubierta (CPCUB), cultivo (CPCUL), suelo (CPSUE) (J m⁻³ °C⁻¹).

Coefficiente de presión en la pared derecha (CPDER), izquierda (CPIZQ), ventana cenital (CPECEN).

DAIR: densidad del aire (kg m⁻³).

$\frac{dVV}{dt}$: variación de humedad absoluta aire (kg[vapor] kg[aire]⁻¹ h⁻¹).

Variación de la temperatura de la cubierta $\left(\frac{dVW}{dt}\right)$, cultivo $\left(\frac{dVX}{dt}\right)$, aire interior $\left(\frac{dVY}{dt}\right)$, suelo $\left(\frac{dVZ}{dt}\right)$ (°C h⁻¹).

Emisividad del cielo (EPCIE), cubierta (EPCUB), cultivo (EPCUL), suelo (EPSUE).

Nomenclature

Cover area (ACUB), crop (ACULT), total soil (ASUET), input (AENT), outlet (ASAL), mesh (AMLL) (m²).

Solar absorptivity of the cover (ALCUB), crop (ALCUL), soil (ALSUE).

Absorptivity to cover thermal radiation (ALCUBT), crop (ALCULT).

Crop height (ALTCUL), side of greenhouse (ALTTL), total of greenhouse (ALTT), not rolled mesh (ALTM), zero displacement plane (D), making measurements (Z) (m).

ANCHO: greenhouse width (m).

Angle corresponding to the solar altitude (B), tilt (THETA), azimuthal orientation (PHI), azimuth to the South (ZZ).

Mesh less discharge coefficient (CD1), mesh (CD2).

CPAIR: specific heat of indoor air (J kg⁻¹ °C⁻¹).

Heat capacity of air (CPAIR), cover (CPCUB), crop (CPCUL), soil (CPSUE) (J m⁻³ °C⁻¹).

Pressure coefficient on the right wall (CPDER), left (CPIZQ), overhead window (CPECEN).

DAIR: air density (kg m⁻³).

$\frac{dVV}{dt}$: air absolute humidity change (kg[vapor] kg[aire]⁻¹ h⁻¹).

Temperature variation of the cover $\left(\frac{dVW}{dt}\right)$, crop $\left(\frac{dVX}{dt}\right)$, indoor air $\left(\frac{dVY}{dt}\right)$, soil $\left(\frac{dVZ}{dt}\right)$ (°C h⁻¹).

Sky emissivity (EPCIE), cover (EPCUB), crop (EPCUL), soil (EPSUE).

Espesor de la cubierta (ESCUB), hojas (ESHOJ) (m).

EVAP_{CANTERO}: evaporación del cantero ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Factor de forma entre la cubierta y el cultivo (FFCBCUL), cubierta y suelo (FFCBSUE), suelo y cultivo (FFSUECUL).

Coefficiente de transferencia de calor convectivo entre cultivo y aire interior (HCCUL), cubierta y aire exterior (HCEXT), cubierta y aire interior (HCINT), suelo y aire interior (HCSUE) ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$).

HEXT: humedad absoluta del aire exterior ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{kg}[\text{aire}]^{-1}$).

Humedad de saturación a la temperatura de la cubierta (HSCUB), aire interior (HSINT), suelo (HSSUE) ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{kg}[\text{aire}]^{-1}$).

IAF: índice de área foliar.

Intensidad de la radiación solar global (IG), radiación solar horizontal (IGH) (W m^{-2}).

IHUM: índice de humedad en el suelo, 0 (seco) - 1.0 (húmedo).

KK: conductividad térmica del aire ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

LAT: latitud norte (°).

LC: longitud característica (m).

LG: largo del invernadero (m).

LMDTI: calor latente de evaporación (J kg^{-1}).

N: renovaciones por hora (Ren h^{-1}).

PATM: presión atmosférica (Pa).

PCSAIR: pendiente de la curva de saturación (Pa s^{-1}).

PORO: porosidad de la malla.

Presión de saturación a la temperatura del aire interior (PSAIR), aire exterior (PSEXT) (Pa).

qn: radiación neta que absorbe el cultivo (W m^{-2}).

qRSOL: radiación solar transmitida por la cubierta y absorbida por el cultivo (W m^{-2}).

Q_{COND}: conducción entre el suelo y el subsuelo (W m^{-2}).

Convección entre la cubierta y el aire interior (Q_{CONVCUBINT}), cubierta con aire exterior (Q_{CONVEXTERIOR}), cultivo y aire interior (Q_{CONVCULTINT}), suelo y aire interior (Q_{CONVSUEINT}) (W m^{-2}).

Q_{LATENTE}: calor debido a la transpiración (W m^{-2}).

Cover thickness (ESCUB), leaves (ESHOJ) (m).

EVAP_{CANTERO}: evaporation of the bed ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Shape factor between the cover and crop (FFCBCUL), cover and soil (FFCBSUE), soil and crop (FFSUECUL).

Coefficient of convective heat transfer between crops and indoor air (HCCUL), cover and outdoor air (HCEXT), cover and indoor air (HCINT), soil and indoor air (HCSUE) ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$).

HEXT: outdoor air absolute humidity ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{kg}[\text{air}]^{-1}$).

Saturation humidity at the temperature of the cover (HSCUB), indoor air (HSINT), soil (HSSUE) ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{kg}[\text{air}]^{-1}$).

IAF: leaf area index.

Intensity of global solar radiation (IG), horizontal solar radiation (IGH) (W m^{-2}).

IHUM: moisture content in soil, 0 (dry) - 1.0 (wet).

KK: thermal conductivity of air ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

LAT: north (°).

LC: characteristic length (m).

LG: greenhouse length (m).

LMDTI: evaporation latent heat (J kg^{-1}).

N: changes per hour (Ren h^{-1}).

PATM: air pressure (Pa).

PCSAIR: slope of the saturation curve (Pa s^{-1}).

PORO: mesh porosity.

Saturation pressure at indoor air temperature (PSAIR), outdoor air (PSEXT) (Pa).

qn: net radiation absorbed by the crop (W m^{-2}).

qRSOL: solar radiation transmitted by the cover and absorbed by the crop (W m^{-2}).

Q_{COND}: conduction between the soil and subsoil (W m^{-2}).

Convection between the cover and inside air (Q_{CONVCUBINT}), cover with outdoor air (Q_{CONVEXTERIOR}), crop and inside air (Q_{CONVCULTINT}), soil and inside air (Q_{CONVSUEINT}) (W m^{-2}).

Q_{LATENTE}: heat due to transpiration (W m^{-2}).

Q_{RSOLAR} : radiación solar absorbida por cubierta, cultivo, suelo (W m^{-2}).

Q_{RTERMICA} : intercambio de radiación térmica en cubierta, cultivo, suelo (W m^{-2}).

Q_{SENSIBLE} : calor sensible entre el cultivo y el aire interior (W m^{-2}).

Q_{VENTIL} : calor perdido en la ventilación (W m^{-2}).

RA: resistencia aerodinámica (RA), estomática (RS) (S m^{-1}).

RTRAN: resistencia a la transpiración del cultivo (S m^{-1}).

Constante de Stefan-Boltzmann (SIGM) ($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-4}$), psicrométrica (GAMM) ($\text{Pa }^{\circ}\text{C}^{-1}$), Von Karman (k)

T: tiempo

TACUB: transmisividad de la cubierta.

Temperatura del cielo (TCIE), aire (TEMP), aire exterior (TEXT), subsuelo (TSUBS) ($^{\circ}\text{C}$).

TRACUL: flujo de transpiración del cultivo ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

V: volumen del invernadero (m^3).

Flujo de ventilación (VDOT) ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Velocidad de viento exterior (VE), interior (VI) (m s^{-1}).

VENT: intercambio de vapor de agua entre aire interior y exterior ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{ kg}[\text{aire}]^{-1}$).

VV: humedad absoluta del aire interior ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{ kg}[\text{aire}]^{-1}$).

Temperatura de la cubierta (VW), cultivo (VX), aire interior (VY), suelo (VZ) ($^{\circ}\text{C}$).

Valor medido (x), predicho (y).

ZO: parámetro de rugosidad, en función de la altura del cultivo (m).

ZP: profundidad de la capa del suelo (m).

Q_{RSOLAR} : solar radiation absorbed by the cover, crop, soil (W m^{-2}).

Q_{RTERMICA} : thermal radiation exchange in the cover, crop, soil (W m^{-2}).

Q_{SENSIBLE} : perceptible heat between the crop and indoor air (W m^{-2}).

Q_{VENTIL} : heat loss from ventilation (W m^{-2}).

RA: drag (RA), stomatal resistance (RS) (S m^{-1}).

RTRAN: resistance to crop transpiration (S m^{-1}).

Constant by Stefan-Boltzmann (SIGM) ($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-4}$), psychrometric (GAMM) ($\text{Pa }^{\circ}\text{C}^{-1}$), Von Karman (k)

T: time

TACUB: cover transmissivity

Sky temperature (TCIE), air temperature (TEMP), outdoor air temperature (TEXT), subsoil temperature (TSUBS) ($^{\circ}\text{C}$).

TRACUL: crop transpiration flux ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

V: greenhouse volume (m^3).

Ventilation flux (VDOT) ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Outdoor wind speed (VE), indoor wind speed (VI) (m s^{-1}).

VENT: water vapor exchange between indoor and outdoor air ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{ kg}[\text{air}]^{-1}$).

VV: absolute humidity of indoor air ($\text{kg}[\text{vapor}] \text{ kg}[\text{air}]^{-1}$).

Cover temperature (VW), crop (VX), indoor air (VY), soil (VZ) ($^{\circ}\text{C}$).

Value measured (x), predicted (y).

ZO: roughness parameter, depending on crop height (m).

ZP: depth of soil layer (m).